В.А. СЕРГЕЕВ
В.В. ТРОШИН
М.Т. МИФТАХОВ

ТЕОРИЯ, КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ ВЕНТИЛЬНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

ЧАСТЬ 1

Учебное пособие

Самара

Самарский государственный технический университет

2013



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

В.А. СЕРГЕЕВ
В.В. ТРОШИН
М.Т. МИФТАХОВ

ТЕОРИЯ, КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ ВЕНТИЛЬНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

ЧАСТЬ 1

Учебное пособие

Самара

Самарский государственный технический университет

2013

Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ

УДК 621.314.21.001.63(075.80)
С 32

Сергеев В.А.

С 32 **Теория, конструкция и расчет вентильного автомобильного генератора:** учеб. пособие / В.А. Сергеев, В.В. Трошин, М.Т. Мифтахов. Ч 1. – Самара. Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 100 с.: ил.

Рассмотрены вопросы конструкции и принципа работы вентильных автомобильных генераторов. Изложена методика расчета главных размеров генератора, магнитной цепи, обмоток статора и возбуждения. Приводится пример расчета главных размеров вентильного автомобильного генератора.

В приложении приведены справочные данные, необходимые для выполнения расчета параметров вентильного автомобильного генератора.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Дисциплина «Теория, конструкция и расчет электрооборудования автомобилей с классическим и гибридным приводом».

УДК 621.314.21.001.63(075.80)
С 32

Р е ц е н з е н т канд. техн. наук *Л.Я. Макаровский*

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время потребители электрической энергии на автомобилях рассчитаны на питание постоянным током. Система электроснабжения автомобиля является одной из основных. Она обеспечивает электрической энергией потребителей, входящих в состав электрооборудования, и производит зарядку аккумуляторной батареи при работающем двигателе внутреннего сгорания. Система электроснабжения состоит из аккумуляторной батареи, генератора с блоком выпрямителей, регулятора напряжения, жгутов проводов, коммутационных аппаратов и аппаратов защиты от возможных аварийных режимов. Генератор с блоком выпрямителей и регулятором напряжения образуют генераторную установку. На современных автомобилях используются синхронные генераторы переменного тока со встроенным в них блоком выпрямителей. Главным требованием, предъявляемым к генераторным установкам, является обеспечение электропитанием потребителей во всех режимах работы автомобиля, а также поддержание стабильного уровня напряжения.

Конструкция, принцип работы, техническое обслуживание и ремонт генераторных установок достаточно хорошо изложены в ряде учебников и учебных пособий. Однако в процессе выполнения курсовых проектов и выпускных квалификационных работ у студентов возникают некоторые затруднения при определении основных размеров и электромагнитном расчете современных генераторов. В учебном пособии приведены рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок, современных магнитных, изоляционных и проводниковых материалов, определяющих качество, надежность и габариты проектируемого генератора. Дана методика расчета генератора, приведен пример расчета.

ВВЕДЕНИЕ

Электрооборудование современных автомобилей и тракторов является сложным комплексом систем электроснабжения, пуска двигателя внутреннего сгорания, зажигания, комфорта, освещения, безопасности и ряда других.

Система электроснабжения является одной из основных и должна надежно работать в любых условиях эксплуатации автомобиля.

В настоящее время на большинстве автомобилей и тракторов применяется система электроснабжения, состоящая из аккумуляторной батареи, генератора, регулятора напряжения, жгутов проводов, коммутационных аппаратов и аппаратов защиты от возможных аварийных режимов.

В качестве генераторной установки применяется вентильный генератор с клювообразными полюсами, встроенными полупроводниковым выпрямителем и интегральным регулятором напряжения. В последнее время регуляторы напряжения кроме основной функции – поддержания напряжения с требуемой точностью – выполняют ряд дополнительных функций.

В учебном пособии последовательно изложена методика расчета, даны рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок, определению основных размеров генератора и расчету обмоток.

Учебное пособие предназначено для студентов направления 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» по подготовке инженеров и направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника» по подготовке бакалавров, изучающих дисциплину «Теория, конструкция и расчет электрооборудования автомобилей и тракторов с классическим и гибридным приводом» и выполняющих курсовые и выпускные квалификационные работы, а также будет полезно для специалистов.

1. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Генератор с регулятором напряжения образуют генераторную установку. На современных автомобилях используются синхронные генераторы переменного тока, работающие на бортовую сеть через встроенный в них блок выпрямителей. Главным требованием, предъявляемым к генераторным установкам, является обеспечение электропитанием потребителей во всех режимах работы автомобиля и поддержание стабильного уровня напряжения.

Генератор является основным активным источником электроэнергии, обеспечивающим питанием всех потребителей и заряд аккумуляторной батареи при работе двигателя. Регулятор напряжения поддерживает заданный уровень напряжения генератора при значительных изменениях нагрузки и частоты вращения ротора генератора. Аккумуляторная батарея как пассивный источник электроэнергии служит для пуска двигателя и обеспечения работы потребителей при неработающем двигателе. Система электроснабжения автомобиля автономна, следовательно она должна полностью обеспечивать электроэнергией потребителей и осуществлять заряд аккумуляторной батареи.

Кроме этого к генераторам предъявляются следующие требования:

– простота конструкции, технологичность в изготовлении;

– долговечность и надёжность в эксплуатации;

– малые габариты, масса и стоимость;

– большая удельная мощность;

– возможность обеспечения заряда аккумуляторной батареи при малой частоте вращения коленчатого вала двигателя в режиме холостого хода;

– конструктивная и технологическая преемственность с выпускаемыми генераторами.

Перечисленным требованиям в большей степени удовлетворяют генераторы переменного тока со встроенным выпрямителем и интегральным регулятором напряжения.

Генератор переменного тока обладает свойством самоограничения отдаваемого тока за счёт увеличения индуктивного сопротивления обмотки якоря при повышении частоты переменного тока. Частота переменного напряжения растёт пропорционально частоте вращения ротора генератора. Благодаря этому генератор не нуждается в ограничении тока. Обмотка возбуждения генератора благодаря своей простой форме является достаточно надёжной в эксплуатации.

Всё это увеличивает срок службы генераторной установки переменного тока почти вдвое по сравнению с генераторной установкой постоянного тока, а повышение срока службы генераторной установки снижает стоимость эксплуатационных затрат.

Сосредоточенная цилиндрическая обмотка возбуждения и клювообразные полюса ротора автомобильного генератора переменного тока, а так же отсутствие коллектора дают возможность при равных габаритных размерах получить большую мощность и сократить расход материалов в 3 раза по сравнению с генераторами постоянного тока. Более низкая частота вращения начала токоотдачи генератора переменного тока обеспечивает лучший баланс энергии в условиях эксплуатации автомобиля в городских условиях.

1.2. КОНСТРУКЦИЯ ВЕНТИЛЬНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

В автомобильных трёхфазных синхронных генераторах (рис. 1.1) применяются клювообразные полюсные половинки, между которыми размещается одна катушка обмотки возбуждения [1, 2, 4].

В автомобильных генераторах с клювообразными полюсами, в отличие от синхронных генераторов классического исполнения, магнитные потоки отдельных полюсов замыкаются через втулку ротора и образуют магнитный поток генератора, равный сумме магнитных потоков всех полюсов одной полярности, что позволяет использовать одну сосредоточенную обмотку возбуждения простой формы и уменьшить расход обмоточной меди. Выводы обмотки возбуждения подключаются к контактным кольцам, расположенным на валу ротора.

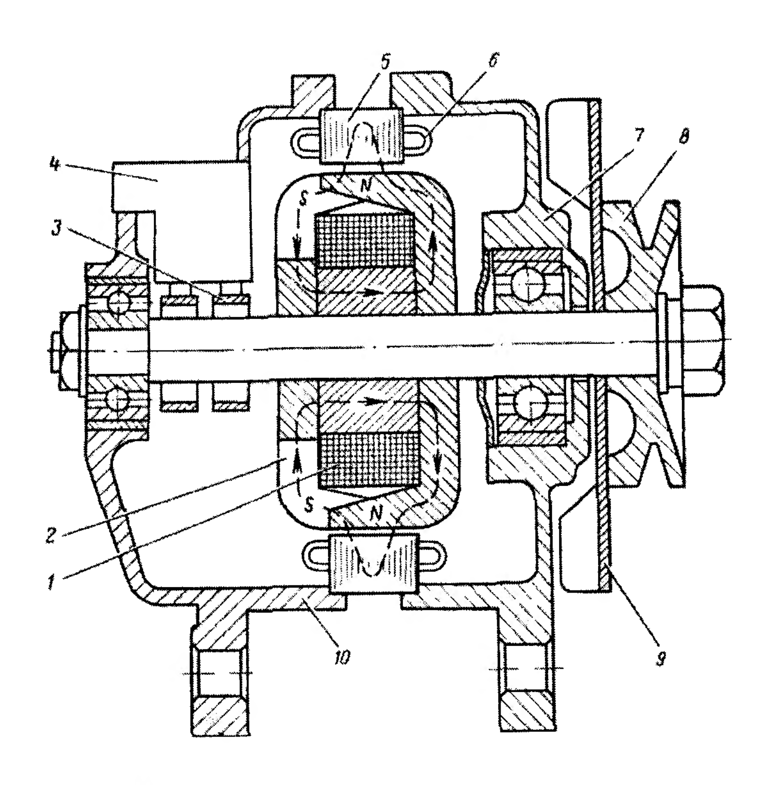


Рис. 1.1. Конструкция автомобильного генератора переменного тока:
1 – обмотка возбуждения; 2 – клювообразные полюсные половинки; 3 – контактные кольца; 4 – щёткодержатель; 5 – статор; 6 – обмотка якоря; 7 – передняя крышка; 8 – шкив; 9 – вентилятор; 10 – задняя крышка со стороны блока выпрямителей

В большинстве отечественных и зарубежных генераторов число полюсов ротора равно 12. На валу ротора генератора размещаются втулка с катушкой возбуждения и полюсные половинки. В последнее время полюсные половинки штампуются заодно с полувтулками, что позволяет исключить один воздушный зазор. Роторы генераторов должны быть обязательно отбалансированы. Для балансировки с полюсных половинок снимают часть металла путем высверливания или фрезерования.

Пакет железа статора набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,8-1,0 мм (табл. П4, П5, П7-П9) или выполняется навивкой «на ребро» из стали 08КП (табл.П10). Навивка «на ребро» обеспечивает меньше отходов при обработке и высокую технологичность. При выполнении пакета железа статора навивкой снаружи статора над пазами обычно имеются выступы, по которым при навивке фиксируется положение слоев друг относительно друга. Эти выступы улучшают охлаждение статора за счет более развитой его наружной поверхности. Необходимость экономии металла привела к созданию кон-

струкции пакета железа статора, набранного из отдельных подковообразных сегментов. Скрепление между собой отдельных листов пакета статора в монолитную конструкцию осуществляется сваркой или заклепками.

В пазах статора размещается трёхфазная обмотка. Число пазов может быть различным при одном и том же числе полюсов ротора и определяется типом трёхфазной обмотки и электрическими характеристиками генератора.

В открытых пазах (рис. 1.2., *а*) витки обмотки удерживаются клиньями из изоляционного материала. В полузакрытых пазах (рис. 1.2., *б*) провода обмотки при многовитковых катушках закрепляют клиньями из изоляционного материала, а если катушка обмотки статора одновитковая, то размеры паза подбирают таким образом, что закрепления проводов в пазу не требуется (рис. 1.2., *в*).

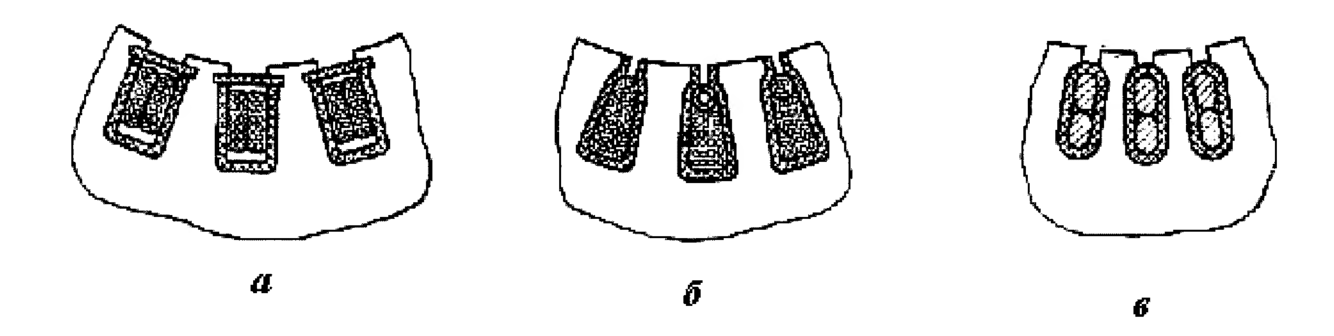


Рис. 1.2. Пазы статора:
а – открытые; *б* – полузакрытые; *в* – полузакрытые для одновитковых катушек

Пазы статора изолируются гибким электроизоляционным материалом или путем напыления специального компаунда. Обмотки якоря и возбуждения изготавливают из медных проводов, изолированных различными лаками марок ПЭТВ, ПЭТ-200 и др. (табл. П2, П3). Обмотки якоря соединяют в звезду при мощности генератора до 500-700 Вт, или в треугольник или в двойную звезду при большей мощности. Это обусловлено тем, что при большей мощности генератора диаметр провода обмотки якоря увеличивается и намотка становится затруднительной. Соединение в треугольник или в двойную звезду

позволяет уменьшить величину тока в проводе обмотки и использовать более тонкий провод.

Крышки 7 и 10 генератора (см. рис. 1.1) изготавливают из сплава алюминия методом литья под давлением или в кокиль. Для повышения прочности посадки шариковых подшипников и крепления генератора отверстия в крышках некоторых генераторов армируют чугунными или стальными втулками.

На крышке со стороны контактных колец размещается пластмассовый щеткодержатель 4 со щетками, на котором располагают встроенный в генератор интегральный регулятор напряжения. В крышках имеются отверстия для проточной вентиляции. Штампованный центробежный вентилятор 9 состоит из одной детали или из крыльчатки и основания, соединенных между собой точечной сваркой. Шкив 8 изготавливается литьем из чугуна или штамповкой из стали. Вентилятор и шкив фиксируются на валу при помощи шпонки и закрепляются гайкой.

В современных автомобильных генераторах переменного тока отечественного и зарубежного производства используется двухполупериодное выпрямление трехфазного напряжения. Блок выпрямителей имеет от шести до 18 диодов. Маломощные диоды размещают непосредственно в пластмассовом основании, а мощные запрессовывают в теплоотводящие пластины. Блок выпрямителей монтируют в крышке со стороны контактных колец для более интенсивного охлаждения воздухом (рис.1.3).

На крышке генератора имеется два изолированных от корпуса выводных зажима: вывод «+» для подключения генератора к аккумуляторной батарее и нагрузке и второй «ш» для соединения обмотки возбуждения генератора с регулятором напряжения, если он размещен не в генераторе. Корпус генератора соединяется с корпусом (массой) автомобиля.

По общей компоновке генераторы разделяются на конструкции, у которых щеточный узел размещен во внутренней полости генератора, и конструкции с размещением его снаружи под специальным пластмассовым кожухом. В последнем случае контактные кольца ротора

имеют малый диаметр, т.к. при сборке генератора они должны пройти через внутренний диаметр подшипника задней крышки (рис. 1.4). Уменьшение диаметра колец способствует повышению ресурса работы щеток и контактных колец. Кроме того, облегчается процедура замены контактных колец в случае их износа.

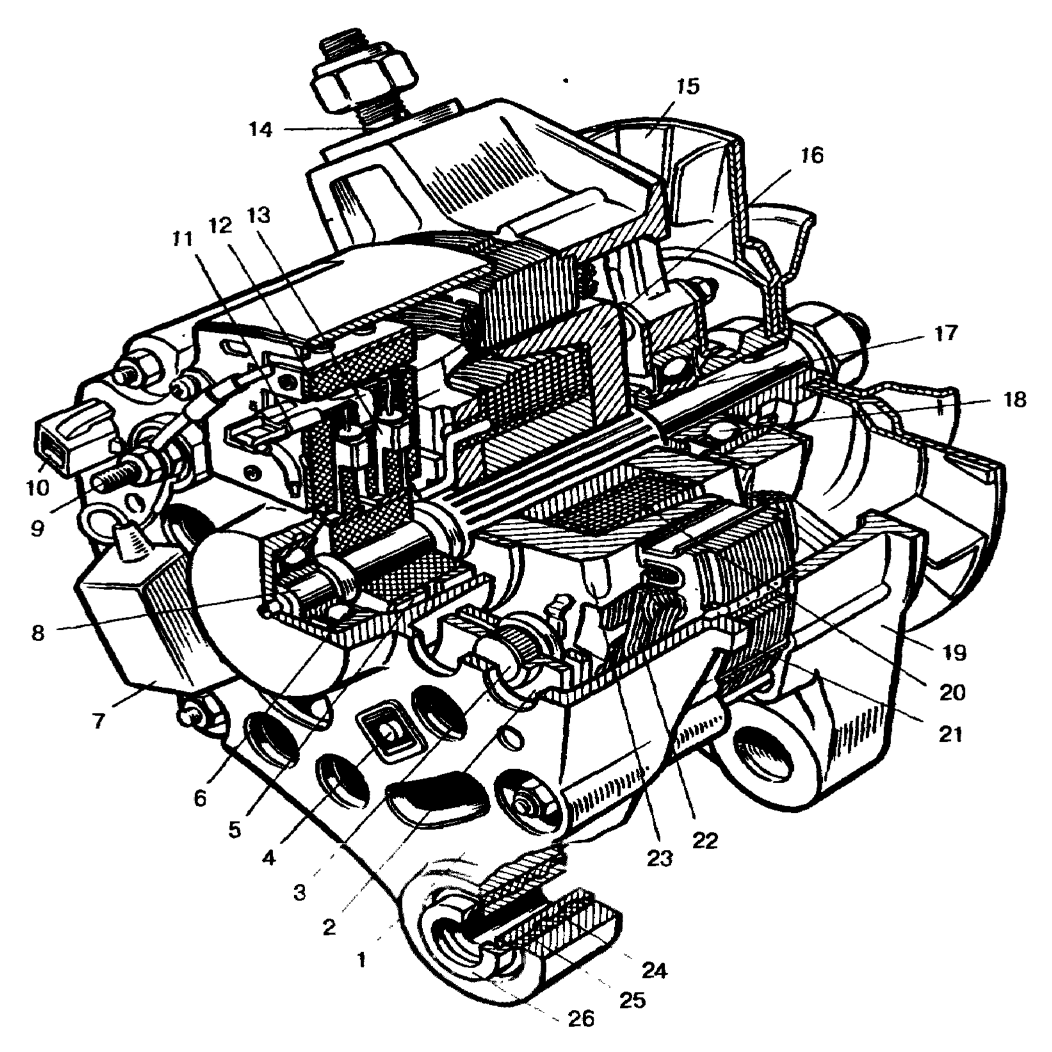


Рис. 1.3. Генератор традиционной конструкции:
1 – задняя крышка; 2 – блок выпрямителей; 3 – вентиль блока выпрямителей; 4 – винт крепления выпрямительного блока; 5 – контактные кольца; 6 – задний шарикоподшипник; 7 – конденсатор; 8 – вал ротора; 9 – вывод плюс генератора; 10 – вывод дополнительного выпрямителя; 11 – вывод регулятора напряжения; 12 – регулятор напряжения; 13 – щетка; 14 – шпилька крепления генератора к натяжной планке; 15 – шкив с вентилятором; 16 – полюсная половина ротора; 17 – дистанционная втулка; 18 – передний шарикоподшипник; 19 – передняя крышка; 20 – обмотка возбуждения; 21 – статор; 22 – обмотка статора; 23 – полюсный наконечник ротора; 24 – буферная втулка; 25 – втулка; 26 – подвижная втулка

Между крышками генератора размещается пакет железа статора с обмоткой якоря. На внутренней поверхности крышек протачиваются посадочные места, которые контактируют с наружной поверхностью пакета статора. Глубина посадочных мест должна быть достаточной для уменьшения возможности появления перекоса подшипников, установленных в крышках.

Вместе с крышками отливаются крепежные лапы для установки генератора на двигателе и натяжное ухо для натяжения приводного ремня. Крепежные лапы у некоторых генераторов имеются на обеих крышках. В последних конструкциях отечественных и зарубежных генераторов применяется однолапое [1] крепление за лапу передней крышки (рис. 1.4, 1.5). Однолапое крепление может осуществляться стыковкой приливов обеих крышек. У некоторых генераторов вместо натяжного уха применяется шпилька.

Катушечная обмотка возбуждения имеет сопротивление, которое определяется максимально допустимой величиной тока регулятора напряжения, наматывается на каркас или непосредственно на втулку ротора. Полюсные половины при сборке напрессовываются на вал ротора под давлением, чтобы уменьшить паразитные воздушные зазоры по торцам втулки, ухудшающие характеристики генератора. При запрессовке материал полюсных половин затекает в проточки вала, делая полюсную систему ротора труднодоступной. В конструкции, где втулка разделена на две части, выполненные заодно с полюсными половинами, паразитный зазор всего один. У генераторов значительную проблему составляет магнитный шум. Для его уменьшения клювы полюсной системы имеют небольшие скосы по краям. Также применяют специальное немагнитное противошумное кольцо, расположенное под острыми краями клювов и приваренное к ним. Кольцо не дает клювам приходить в колебание и издавать звук.

Отечественные генераторы оборудованы цилиндрическими медными кольцами, к которым припаяны или приварены концы обмотки

возбуждения. В мировой практике встречаются кольца из латуни или нержавеющей стали, что снижает износ и окисление, особенно во влажной среде.

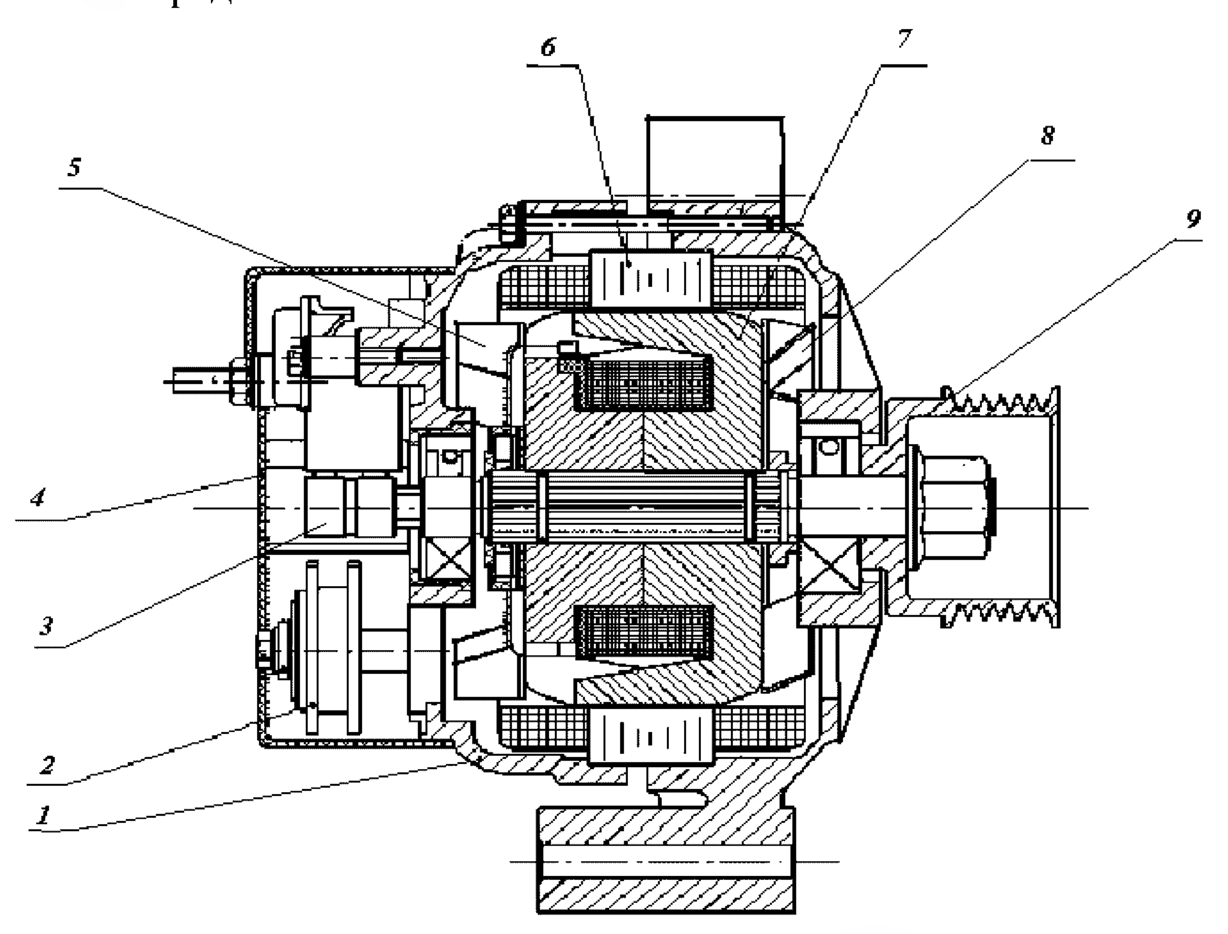


Рис. 1.4. Генератор компактной конструкции 94.3701:
1 – задняя крышка; 2 – блок выпрямителей; 3 – контактные кольца;
4 – пластмассовый кожух; 5, 8 – вентиляторы; 6 – статор; 7 – ротор; 9 – шкив

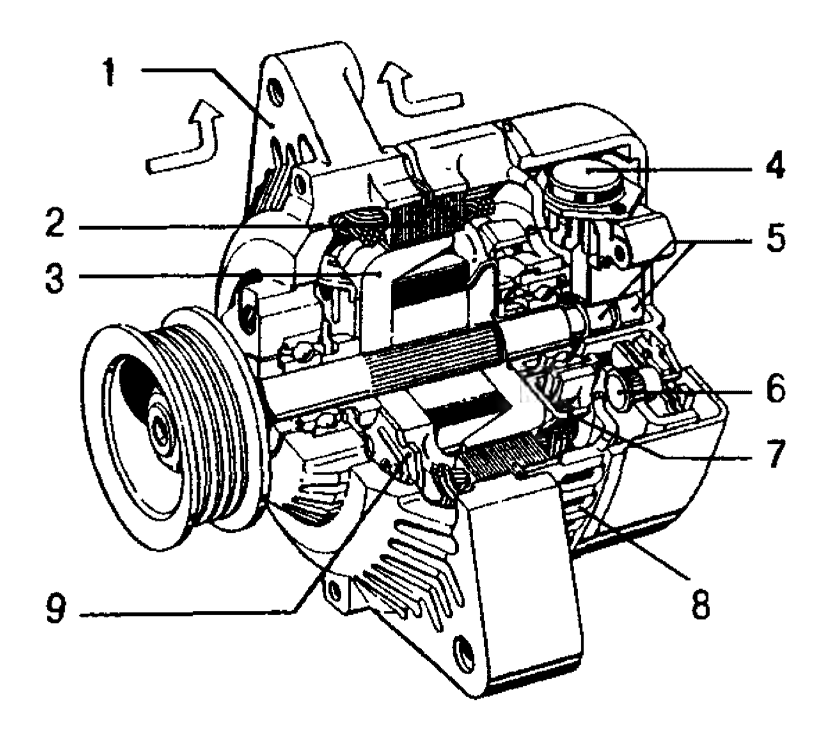


Рис. 1.5. Генератор фирмы *Bosch*:
1, 8 – крышки; 2 – статор; 3 – ротор; 4 – регулятор напряжения; 5 – контактные кольца; 6 – блок выпрямителей; 7, 9 – вентиляторы

Щеточный узел имеет пластмассовый корпус, в который установлены щетки двух типов: меднографитные или электрографитные. В отечественных генераторах применяются электрографитные щетки ЭГ51А размером 5-8-18 мм или меднографитные щетки М1 размером 6-6,5-13 мм (табл. П13-П14). Электрографитные щетки имеют повышенное падение напряжения в контакте с кольцами, что неблагоприятно сказывается на выходных характеристиках генератора, но обеспечивают меньший износ контактных колец.

Качество обеспечения питанием потребителей, в том числе заряд АКБ, зависит от передаточного числа ременной передачи, равного отношению диаметров шкивов коленчатого вала двигателя и генератора. При больших передаточных числах происходит ускоренный износ ремня. Для клиновидных ремней это число не превышает 2,5. Высокое передаточное число (до 3) возможно у поликлиновых ремней, применение которых расширяется вместе с генераторами компактной конструкции. Поликлиновый ремень способен приводить во вращение ряд дополнительных агрегатов, в то время как клиновой работает лишь на вращение помпы системы охлаждения и генератор-

ной установки. На генераторах с диаметром вала под установку шкива до 17 мм шпонка под шкив обычно не устанавливается.

Для охлаждения генераторов применяется система с одним центробежным вентилятором, закрепленным на валу снаружи около шкива (рис. 1.6, *а*) или с двумя вентиляторами, установленными на торцевых поверхностях полюсных половин ротора (рис. 1.6, *б*).

В генераторах с одним вентилятором воздух засасывается через вентиляционные окна в крышке со стороны контактных колец, во втором – через вентиляционные окна обеих крышек. Применение двух внутренних вентиляторов позволяет увеличить частоту вращения ротора, поэтому их называют высокоскоростными.

Для автомобилей с высокой температурой под капотом или работающих при повышенной запыленности, применяют конструкцию с поступлением забортного воздуха через кожух с патрубком и воздуховодом (рис. 1.6, *в*).

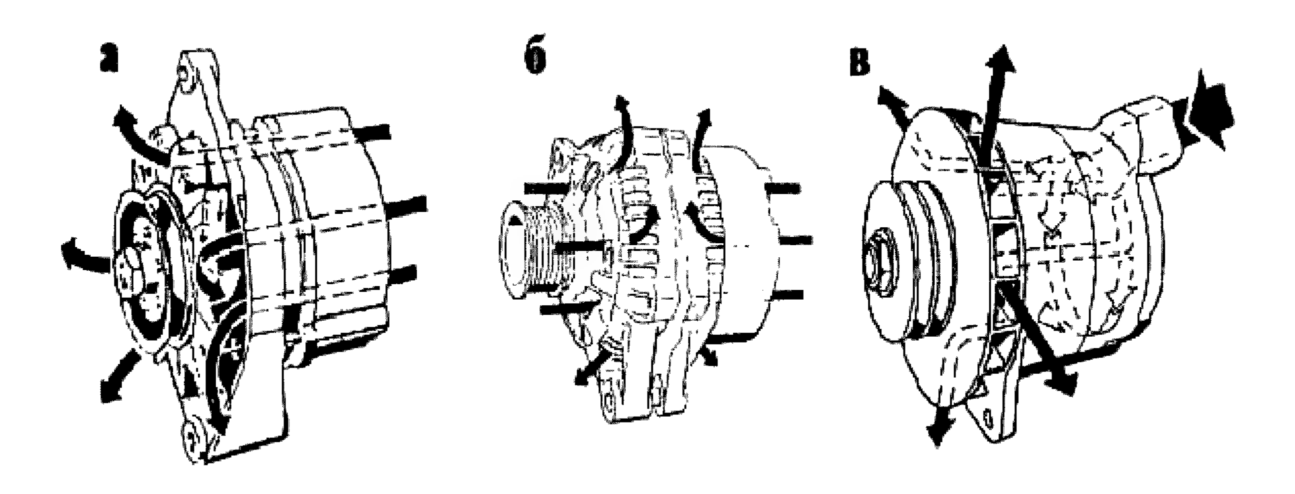


Рис. 1.6. Системы охлаждения генераторов:
а – с одним вентилятором; *б* – с двумя вентиляторами; *в* – генераторов с повышенной температурой подкапотного пространства. Стрелками указано направление движения охлаждающего воздуха

Фазы обмотки якоря соединяются в звезду или в треугольник. Ниже приведены некоторые схемы укладки витков обмотки якоря генератора. Схему обмотки якоря по типу одинарной звезды можно использовать для генераторов с числом пазов на полюс и фазу 0,5; 1 и 2. Каждая фаза петлевой обмотки содержит 6 непрерывно намо-

танных катушек (рис. 1.7), содержащих каждая несколько витков. На рис. 1.8 представлена волновая обмотка якоря. Половина витков обмотки фазы наматывается в одну сторону, а вторая половина – в другую. Фазы обмотки, изображённой на рис. 1.9 и 1.10., соединены в двойную звезду.

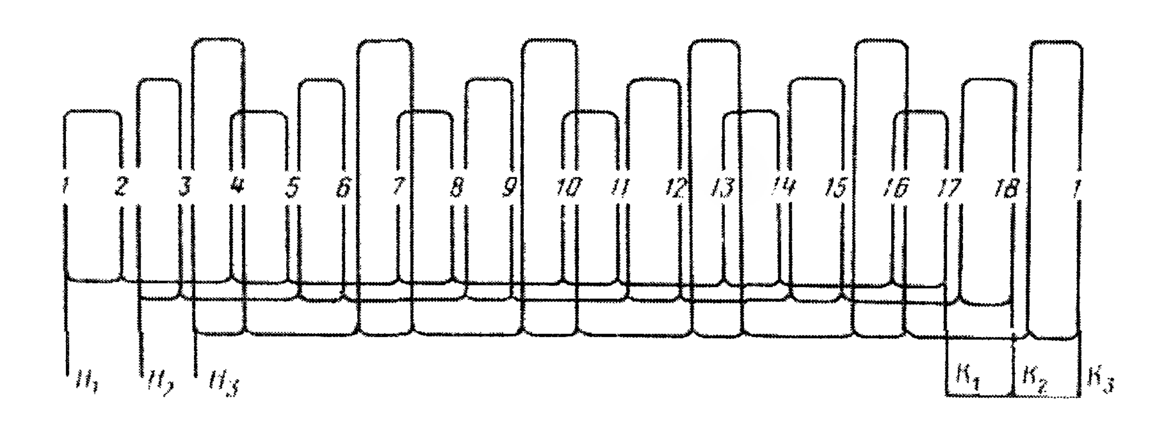


Рис. 1.7. Обмотка якоря при соединении фаз в звезду, Z = 18:
Н1, Н2, Н3 – начало фаз;
К1, К2, К3 – концы фаз

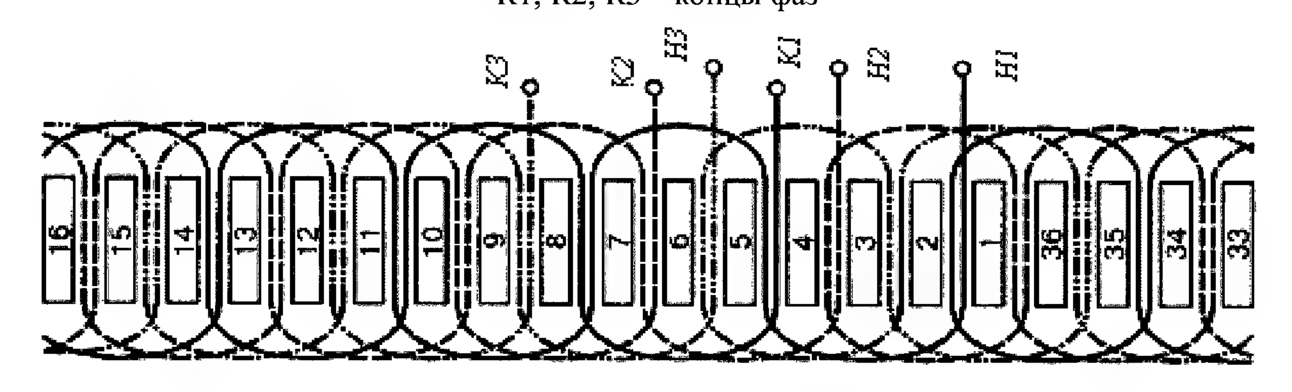


Рис. 1.8. Волновая обмотка якоря при соединении фаз в звезду, Z= 36:
Н1, Н2, Н3 – начала фаз; К1, К2, К3 – концы фаз

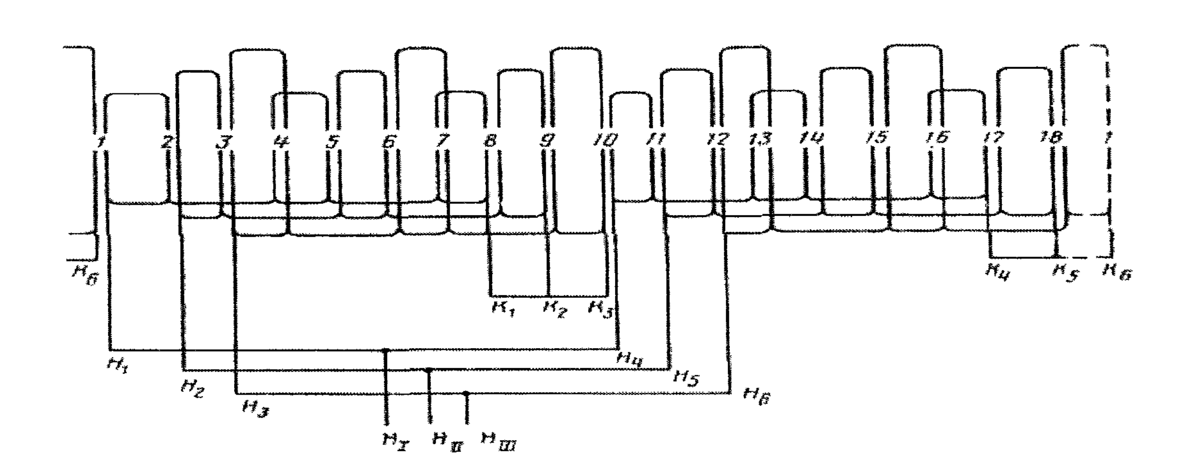


Рис.1.9. Соединение обмоток фаз якоря в двойную звезду (Z = 18):
Н1, Н2, Н3, К1, К2, К3 – начала и концы фаз первой звезды; Н4, Н5, Н6, К4, К5, К6 – начала и концы фаз второй звезды; НI, НII, НIII – выводы фаз обмоток якоря

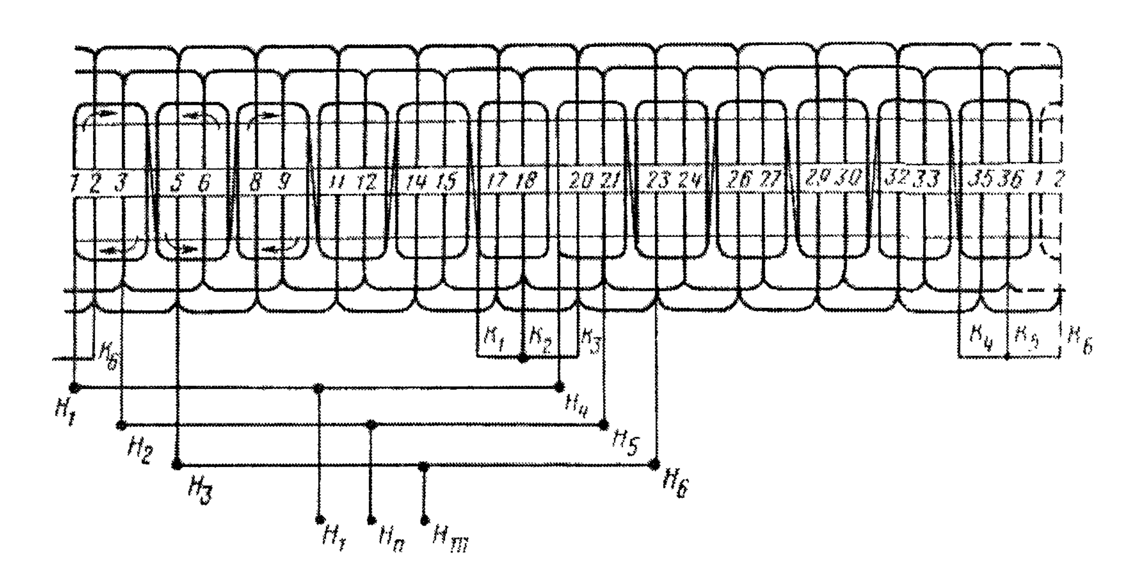


Рис.1.10. Соединение обмоток якоря в двойную звезду
с намоткой «в развал» (число пазов 36):
Н1, Н2, Н3, К1, К2, К3 – начало и концы фаз первой звезды;
Н4, Н5, Н6, К4, К5, К6 – начала и концы фаз второй звезды;
НI, НII, НIII – выводы фаз обмоток якоря

Для повышения отдаваемой мощности генератора на большой скорости движения автомобиля и сохранения начала токоотдачи на малой скорости на статоре генераторов размещают 2 самостоятельные трёхфазные обмотки, соединённые в звезду и имеющие различное число витков или разное сечение провода. На рис. 1.11, *а* показана схема соединений обмоток такого генератора. Обмотка якоря 2 намотана проводом меньшего сечения, чем обмотка 3, и имеет большее число витков. Обмотка 3, наоборот, имеет меньше витков и намотана из более толстого провода. Каждая обмотка присоединена к своему комплекту диодов 4, которые имеют общие плюсовые и минусовые выводы.

Эта схема соединения обмоток позволяет обеспечить достаточно большую мощность генератора и сохранить малую частоту вращения начала токоотдачи.

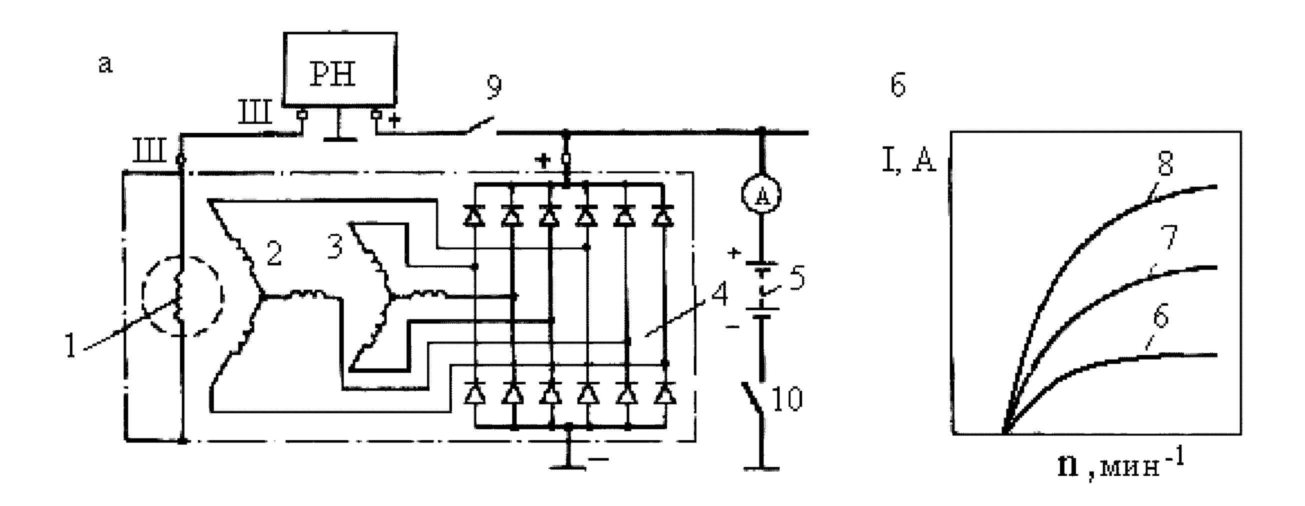


Рис. 1.11. Схема соединений генераторной установки
с двумя обмотками якоря:
1 – обмотка возбуждения генератора; 2 – первая трёхфазная обмотка;
3 – вторая трёхфазная обмотка; 4 – блок выпрямителей; 5 – аккумуляторная батарея;
6 – токоскоростная характеристика обмотки 2; 7 – токоскоростная характеристика обмотки 3;
8 – токоскоростная характеристика генератора; 9 – выключатель зажигания;
10 – выключатель массы

При малой частоте вращения коленчатого вала двигателя в генераторе работает обмотка 2 с большим числом витков и обеспечивает потребителей электроэнергией. При движении автомобиля с большой скоростью вступает в работу обмотка 3 и электроэнергия потребителям поступает от двух обмоток: от обмотки 2 примерно 1/3 и от обмотки 3 примерно 2/3 общей величины электроэнергии. На рис. 1.11 *б* показаны токоскоростные характеристики обмоток 2 и 3 и результирующая токоскоростная характеристика обеих обмоток.

Наличие контактных колец и щеток снижает надежность генераторов. Там, где возникают требования повышенной надежности и долговечности, главным образом на магистральных тягачах, междугородних автобусах и т. п., применяются бесконтактные генераторы. Повышенная надежность этих генераторов обеспечивается тем, что у них отсутствует щеточно-контактный узел, подверженный износу и загрязнению, а обмотка возбуждения неподвижна. Недостатком генераторов этого типа являются увеличенные габариты и масса. Бесконтактные генераторы выполняются с максимальным использованием конструктивной преемственности генераторов с щетками. Наиболее

распространена конструкция бесконтактного автомобильного генератора, представленная на рис. 1.12.

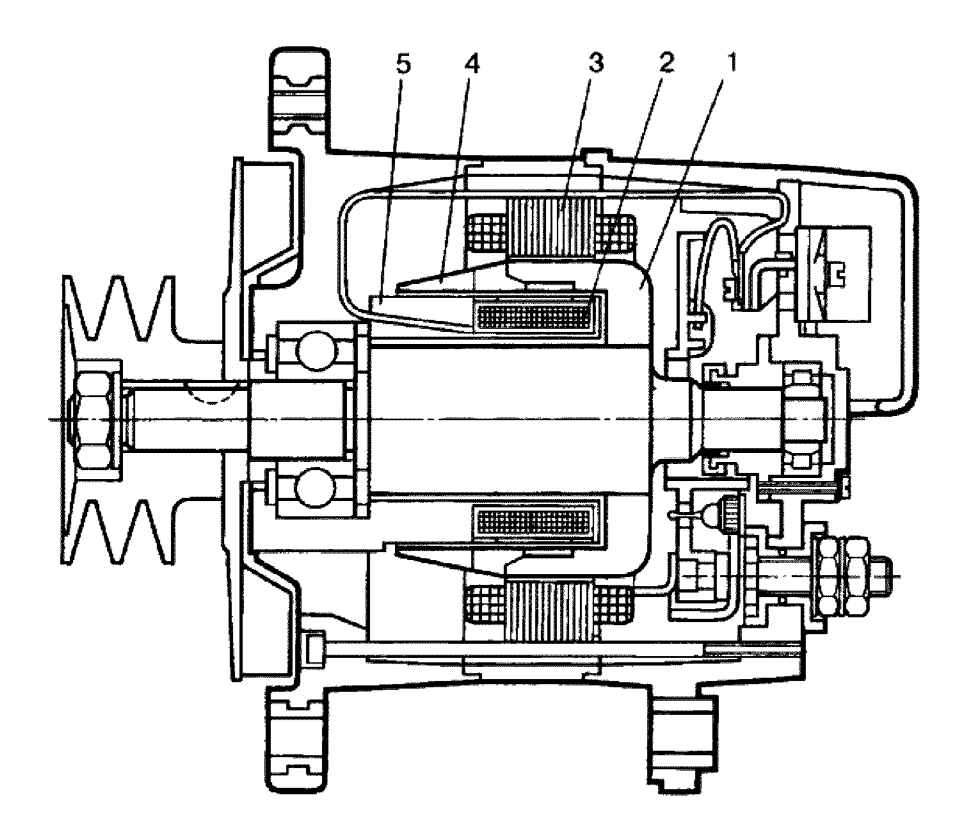


Рис. 1.12. Бесконтактный генератор:
1, 4 – клювообразные полюсные половины; 2 – обмотка возбуждения;
3 – статор; 5 – магнитопровод обмотки возбуждения

На выпуске генераторов такого типа специализируется американская фирма *Delco-Remy*, являющаяся отделением *General Motors* [1]. Отличие этой конструкции состоит в том, что одна клювообразная полюсная половина посажена на вал, как у обычного щеточного генератора, а другая в урезанном виде приваривается к ней по клювам немагнитным материалом.

Каркас обмотки возбуждения помещен на магнитопроводе, закрепленном на крышке генератора. Между этим магнитопроводом и полюсной системой имеется воздушный зазор. При вращении вала сидящая на нем полюсная половина вместе с приваренной к ней другой полюсной половиной вращаются при неподвижной обмотке возбуждения. В принципе, работа этого генератора аналогична работе генератора обычного исполнения. Французская фирма *Sev Marchal* выпускала бесконтактный генератор «Фред» с укороченными полю-

сами. Клювы этого генератора не перекрывают друг друга. В щель между клювами проходят элементы крепления обмотки возбуждения к статору, которая при этом как бы висит над втулкой ротора. Некоторыми американскими фирмами выпускались и индукторные вентильные генераторы, а итальянской фирмой *Ducati* выпускались бесконтактные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов и управляемым силовым выпрямителем на тиристорах.

1.3.ПРИНЦИП РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА

Автомобильные вентильные генераторы переменного тока представляют собой синхронную электрическую машину, фазы обмотки якоря которой присоединены к полупроводниковому выпрямителю. Частота вращения ротора n и частота наводимой в фазах обмотки якоря электродвижущей силы f связаны между собой известным соотношением:

$$f = \frac{pn}{60}, \tag{1.1}$$

где p – число пар полюсов генератора.

Обмотка якоря генератора характеризуется числом пазов на полюс и фазу q, определяемым формулой

$$q = \frac{Z}{2pm}, \tag{1.2}$$

где Z – количество пазов на статоре;

m – количество фаз генератора.

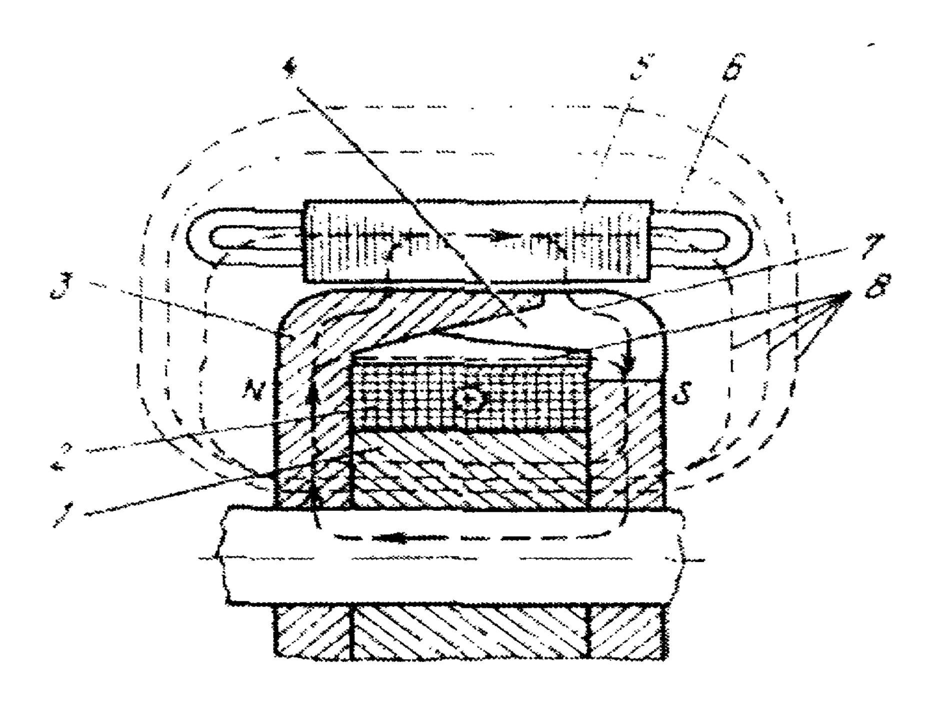


Рис. 1.13. Магнитная система генератора:
1 – втулка; 2 – обмотка возбуждения; 3 – полюсные половины северной полярности; 4 – полюсные половины южной полярности; 5 – статор; 6 – обмотка якоря; 7 – основной магнитный поток; 8 – магнитный поток рассеяния

В автомобильных вентильных генераторах наибольшее распространение получили обмотки с q равным 0,5; 1 и 2.

Катушки обмотки якоря в большинстве случаев насчитывают по нескольку витков, но на схемах (рис. 1.7 – 1.10) они, как правило, условно обозначаются одновитковыми, так как от числа витков в катушках схема соединений катушек друг с другом не зависит.

Электродвижущая сила (ЭДС) в фазах обмотки якоря генератора наводится при пересечении проводников этой обмотки магнитным потоком, созданным током возбуждения генератора (эффект электромагнитной индукции). При подаче постоянного напряжения на обмотку возбуждения 2 от какого-либо источника по обмотке потечет ток, который создает магнитный поток, неподвижный относительно обмотки возбуждения генератора. Магнитный поток замыкается по магнитной системе генератора (рис. 1.13). Основная или рабочая часть 7 потока проходит через втулку 1, распределяется по клювообразным полюсам 3 северной полярности, выходит из полюсов этой полярности, пересекает воздушный зазор между ротором и статором, проходит по зубцам и спинке статора 5, повторно пересекает воздуш-

ный зазор, входит в клювообразные полюса 4 южной полярности и замыкается через эти полюса опять на втулку 1. Меньшая часть магнитного потока или потока рассеяния 8, замыкается по воздуху мимо магнитопровода статора, не охватывая проводники его обмотки. Эта часть магнитного потока не участвует в наведении электродвижущей силы в обмотке якоря 6. При движении ротора под каждым зубцом статора проходят попеременно то северный, то южный полюс ротора. Магнитный поток, проходя через зубцы, пересекает проводники обмотки якоря, изменяется по величине и по направлению и наводит в фазах обмотки переменную ЭДС $E_ф$.

Действующее (эффективное) значение электродвижущей силы, наводимой в обмотке одной фазы генератора при данной величине магнитного потока, определяется по формуле

$$E_ф = 4{,}44 k_{об} f w Ф_δ, \qquad (1.3)$$

где f – частота ЭДС;

w – число последовательно соединённых витков в фазе обмотки якоря;

$Ф_δ$ – величина магнитного потока в воздушном зазоре генератора;

$k_{об}$ – обмоточный коэффициент.

Так как стороны одного витка катушки не всегда расположены точно на расстоянии полюсного деления, то ЭДС, индуктированные в двух сторонах одного и того же витка, могут не совпадать по фазе. Суммирование этих ЭДС необходимо выполнять геометрически. Это обстоятельство учитывается обмоточным коэффициентом $k_{об}$, который определяется отношением геометрической суммы ЭДС, индуктированных в отдельных проводниках обмотки, к их арифметической сумме.

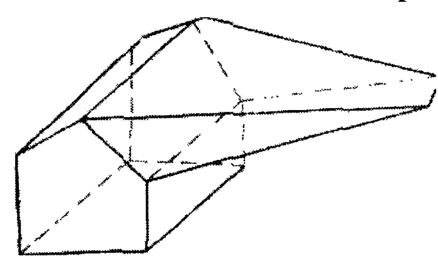


Рис. 1.14. Форма полюса генератора

Значение обмоточного коэффициента $k_{об}$ равно 0,866 для трёхфазных генераторов при q = 0,5; 1 для трёхфазных генераторов при q = 1; 0,966 для трёхфазных генераторов при q = 2.

Характер изменения ЭДС в проводниках обмотки якоря, или форма ЭДС, определяется кривой распределения магнитной индукции в зазоре по окружности статора, которая, в свою очередь, зависит от формы полюса.

В автомобильных вентильных генераторах применяется клювообразный полюс (рис. 1.14), имеющий трапецеидальную форму поверхности, обращённую к расточке статора. Такой полюс обеспечивает форму кривой ЭДС, близкую к форме синусоиды.

Переменное напряжение и ток, индуктированные в обмотке якоря, преобразуются при помощи кремниевых диодов, собранных по трёхфазной двухполупериодной схеме, в постоянное пульсирующее напряжение и ток. В этой схеме (рис. 1.15, *а*) применены 6 вентилей – 3 для положительной полярности и 3 для отрицательной.

Максимальные значения индуктированных в обмотках фаз генератора напряжений $U_{1фмах}U_{2фмах}U_{3фмах}$ изображены на векторной диаграмме (рис. 1.15, *б*, слева) тремя векторами, сдвинутыми относительно друг друга на 120 электрических градусов (т.е. 1/3 периода Т). Мгновенные значения напряжений $U_{1ф}$, $U_{2ф}$, $U_{3ф}$ изображены в правой части рис. 1.15, *б*. С течением времени все 3 вектора на векторной диаграмме, не изменяя взаимного расположения, вращаются против часовой стрелки, делая один оборот за один период (Т) переменного напряжения. Мгновенные значения напряжений $U_{1ф}$, $U_{2ф}$, $U_{3ф}$ равны проекциям этих векторов на вертикальную ось и изменяются по гармоническому закону. Положительные направления напряжений $U_{1ф}$, $U_{2ф}$, $U_{3ф}$ (т.е. их направления во время положительной полуволны переменного напряжения) показаны на схеме обмотки якоря генератора сплошными стрелками. В момент времени t_1 (рис. 1.15, *б*, справа), соответствующий 1/6 периода Т, или 60° поворота векторов от начального положения, мгновенные значения фазных напряжений будут равны:

$$U_{1ф} = U_{1фмах} \sin 60° = U_{1фмах} \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (1.4)$$

$$U_{2ф} = U_{2фмах} \sin 300° = -U_{2фмах} \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (1.5)$$

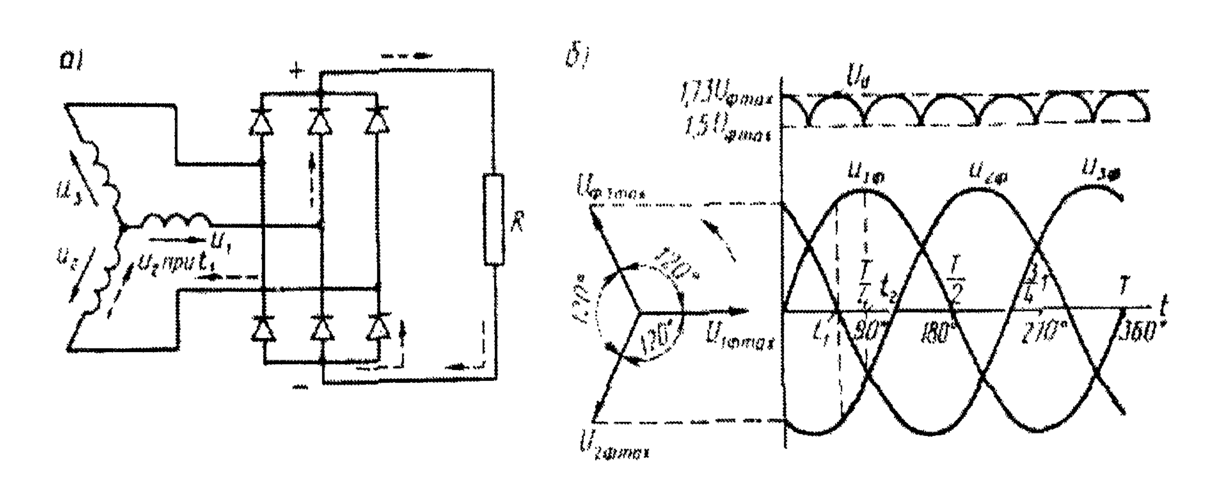


Рис. 1.15. Схема выпрямления переменного тока автомобильного генератора:
а – схема соединения трёхфазной обмотки якоря генератора с вентилями;
б – векторная диаграмма и кривые изменения мгновенных значений фазных и выпрямленного напряжений по времени; *R* – условное сопротивление нагрузки.

Поскольку напряжение $U_{2ф}$ в момент t_1 отрицательно, то его фактическое направление в обмотке будет обратным; на рис. 1.15, а оно изображено пунктирной стрелкой.

Напряжение, приложенное к вентилям выпрямительного устройства, при соединении фаз статора в звезду будет равно разности напряжений двух фаз (в данном случае 1-й и 2-й), поскольку фазы соединены в нулевую точку концами, а максимальные величины напряжения всех фаз равны друг другу.

$$U_{1ф} - U_{2ф} = U_{1фмах} \frac{\sqrt{3}}{2} - (-U_{2фмах} \frac{\sqrt{3}}{2}) = U_{фмах}\sqrt{3} = 1{,}73 U_{фмах}, \quad (1.6)$$

$$U_{1фмах} = U_{2фмах} = U_{3фмах} = U_{фмах}. \quad (1.7)$$

Это напряжение, равное 1,73 $U_{ф.мах}$, создает ток, изображенный на рис. 1.15, *а* пунктирными стрелками и замыкающийся на внешнее сопротивление *R* через 2 вентиля: через средний положительной и правый отрицательной полярности.

В следующие моменты времени напряжение первой фазы будет увеличиваться, а напряжение второй быстро уменьшаться по абсо-

лютной величине. В результате картина прохождения токов будет прежняя, но суммарное напряжение первой и второй фазы немного уменьшится.

В момент времени t_2, соответствующий четверти периода Т или повороту векторов на 90°, напряжение первой фазы достигает максимума, а напряжение второй фазы уменьшится до половины максимального значения. Разность напряжений первой и второй фазы будет равна:

$$U_{1ф} - U_{2ф} = U_{1ф мах} - (-0{,}5U_{2ф мах}) = 1{,}5U_{ф мах}. \tag{1.8}$$

В последующие моменты времени абсолютная величина напряжения третьей фазы $U_{3ф}$ становится больше уменьшающегося фазного напряжения $U_{2ф}$, и выпрямленный ток замыкается уже через обмотки и диоды фаз 1 и 3.

Таким образом, в любой момент времени в контур выпрямленного тока нагрузки обязательно оказываются включёнными по одному вентилю положительной и отрицательной полярности, кроме того, в выпрямлении тока будет участвовать лишь та пара вентилей, которая находится под более высоким напряжением, чем другие. Выпрямленное напряжение U_d (рис. 1.15, *б*) будет пульсировать, изменяясь по отрезкам синусоид с частотой в 6 раз большей, чем частота переменного тока, индуктированного в фазах обмотки якоря генератора, и величина напряжения в идеальном случае (пренебрегая падением напряжения в вентилях и соединительных проводах) будет изменяться от 1,5 до 1,73 $U_{ф.мах}$.

Так как выпрямленное напряжение и ток используются на автомобиле для питания потребителей и заряда аккумуляторной батареи, то нас интересует среднее значение выпрямленного (пульсирующего) напряжения, которое, как показывают расчёты, равно $U_d = 1{,}65U_{ф.мах}$.

Приборы измеряют не амплитудное, а действующее значение переменного тока, и все расчёты выполняются по действующим значениям переменного напряжения и тока, которые в $\sqrt{2} = 1{,}41$ раза меньше амплитудных значений. Поэтому среднее значение выпрямленного напряжения будет равно:

$$U_d = 1{,}65U_{ф.мах} = 1{,}65*1{,}41U_ф = 2{,}34\ U_ф, \tag{1.9}$$

где $U_ф$ – действующее значение фазного напряжения генератора.

Величина выпрямленного тока определяется как:

$$I_d = \sqrt{\frac{3}{2}} I_ф = 1{,}223 I_ф, \quad (1.10)$$

где $I_ф$ – действующее значение фазного тока генератора.

В реальных случаях из-за падения напряжения в диодах, соединительных проводах и контактах соотношения между величинами выпрямленного и фазного напряжения и тока отличаются от приведенных выше теоретических значений. Их более точная величина обычно определяется экспериментально.

1.4. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Свойства автомобильного генератора переменного тока определяются рядом характеристик, связывающих между собой следующие основные величины: фазное $U_ф$, линейное $U_л$ и выпрямленное U_d напряжения; фазный ток $I_ф$; выпрямленный ток I_d нагрузки генератора: ток возбуждения $I_в$ генератора; частота вращения n ротора генератора. Характеристики генератора представляют собой зависимость между двумя какими-либо величинами при неизменных значениях остальных величин. Основными характеристиками автомобильного генератора считаются:

– характеристика холостого хода – зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения $E=f(I_в)$ при постоянной частоте вращения и токе нагрузки I_d, равном нулю;

– внешняя характеристика – зависимость выпрямленного напряжения генератора U_d от тока нагрузки I_d при постоянной частоте вращения ротора n и определенном значении тока возбуждения $I_в$;

– токоскоростная характеристика – зависимость тока нагрузки I_d генератора от частоты вращения ротора генератора n при неизменных значениях выпрямленного напряжения U_d на зажимах генератора и тока возбуждения генератора $I_в$.

Автомобильные генераторы приводятся во вращение от двигателя внутреннего сгорания с постоянным передаточным отношением привода, поэтому частота вращения ротора генератора может изменяться от минимального значения, соответствующего частоте вращения коленчатого вала в режиме холостого хода автомобильного двигателя, до максимального значения, соответствующего максимальной скорости движения автомобиля.

Отношение минимальной и максимальной частот вращения ротора генераторов может составлять 1: 12 для автомобилей с карбюраторными двигателями и 1: 4 для автомобилей с дизельными двигателями. Поэтому характеристики автомобильных генераторов в противоположность общепромышленным генераторам определяют не при одном значении частоты вращении *n*, а при различных значениях, покрывающих весь диапазон изменения частоты вращения от минимальной до максимальной.

Характеристика холостого хода для различных частот вращения выражается семейством характеристик (рис. 1.16), на которых ЭДС холостого хода пропорциональна частоте вращения *n,* так как при заданном значении тока возбуждения $I_в$ магнитный поток Φ_δ в воздушном зазоре не зависит от частоты вращения. По характеристике холостого хода определяется начальная частота вращения ротора генератора, при которой напряжение генератора достигает номинальной величины.

На практике характеристику холостого хода определяют или по величине фазной ЭДС $E_ф$, или по линейному значению ЭДС $E_л = \sqrt{3}E_ф$, или иногда по значению выпрямленного напряжения холостого хода U_d, практически равного для трехфазной двухполупериодной схемы выпрямления $U_d = (2{,}0 \div 2{,}15)E_ф$.

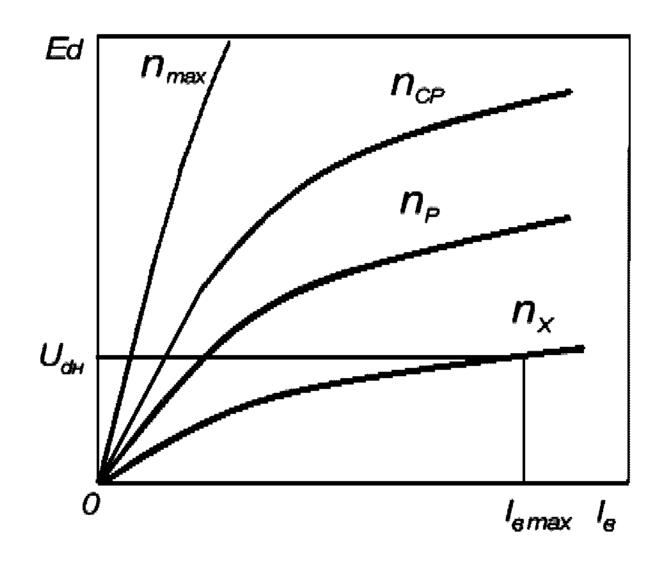


Рис. 1.16. Семейство характеристик холостого хода при различных частотах вращения ротора генератора

Внешняя характеристика автомобильного генератора также выражается семейством кривых, соответствующих различным частотам вращения ротора генератора (рис. 1.17).

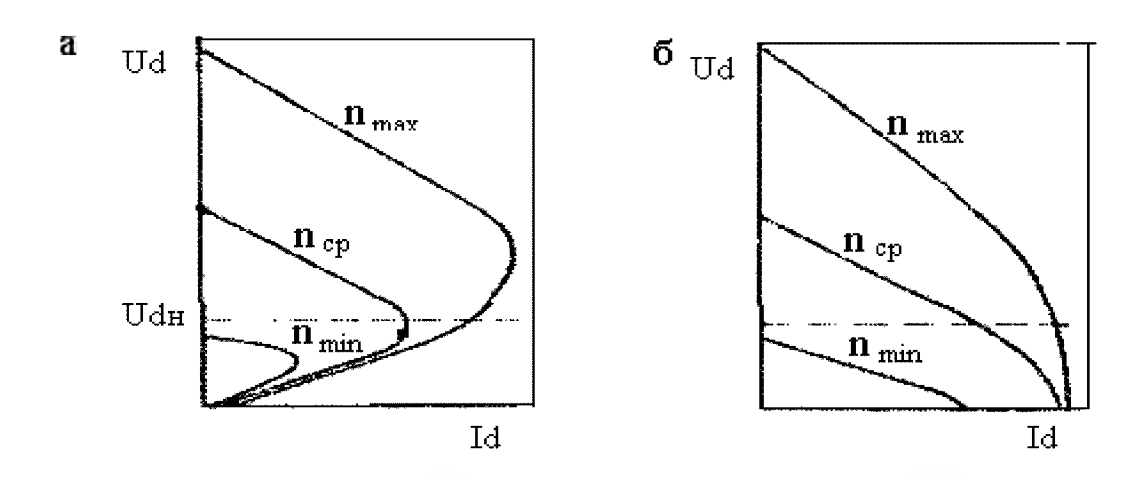


Рис. 1.17. Семейство внешних характеристик автомобильного генератора при различных частотах вращения ротора:
а – при самовозбуждении; б – при независимом возбуждении

Снижение напряжения при увеличении нагрузки автомобильного генератора происходит из-за падения напряжения в активном и индуктивном сопротивлениях обмоток статора, размагничивающего действия магнитного потока реакции якоря, уменьшающего магнитный поток в воздушном зазоре и из-за падения напряжения в цепи выпрямителя.

Внешние характеристики могут определяться при самовозбуждении или при независимом возбуждении. Схемы соединения для определения внешних характеристик показаны на рис. 1.18, 1.19.

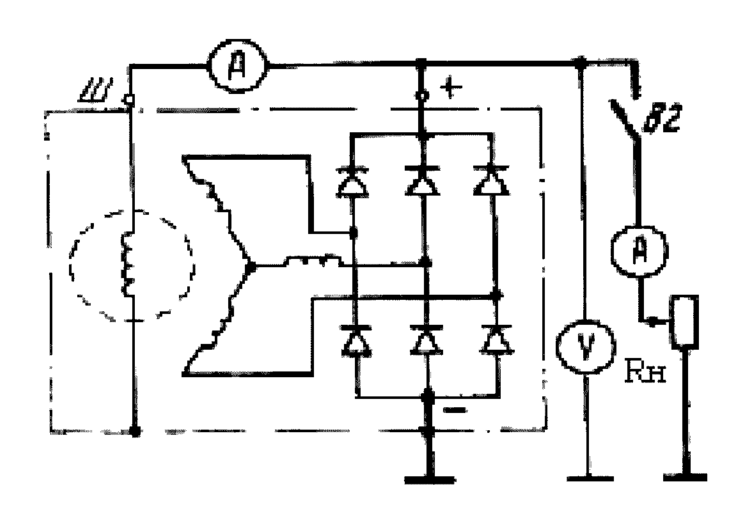


Рис. 1.18. Электрическая схема соединения для определения семейства внешних характеристик при самовозбуждении

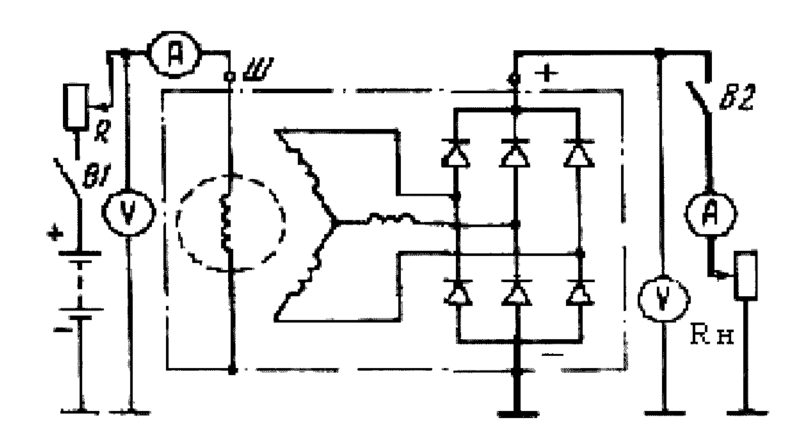


Рис. 1.19. Электрическая схема соединения для определения семейства внешних характеристик при независимом возбуждении

Внешние характеристики при самовозбуждении определяются по схеме, показанной на рис. 1.18. Каждая характеристика определяется при неизменном значении частоты вращения генератора и неизменном сопротивлении цепи возбуждения. Верхняя ветвь внешней характеристики на участке *АВ* (см. рис. 1.17 *а)* соответствует устойчивой работе генератора, когда при уменьшении сопротивления нагрузочного реостата напряжение генератора падает медленнее, чем сопротивление, и ток генератора возрастает. Нижняя ветвь внешней характеристики соответствует неустойчивой работе генератора.

Из семейства внешних характеристик, определенных при самовозбуждении, определяется, как правило, величина максимального тока, которая обеспечивается при заданном номинальном или регулируемом значении напряжения.

Семейство внешних характеристик, определенных по схеме независимого возбуждения, изображено на рис. 1.17, *б.* Каждая характеристика снимается при определенных значениях частоты вращения ротора генератора и напряжения постоянного тока, подводимого к обмотке возбуждения, что соответствует определенному значению тока возбуждения генератора.

В отличие от внешних характеристик, определенных при самовозбуждении, ток короткого замыкания генератора при независимом возбуждении больше номинального тока нагрузки и имеет максимальную величину при максимальной частоте вращения. Значение тока нагрузки, определяемое при независимом возбуждении, больше значения тока нагрузки, определяемого по схеме самовозбуждения, на величину тока возбуждения.

Токоскоростная характеристика генератора также может определяться при независимом возбуждении или при самовозбуждении, однако основное практическое значение имеет характеристика, снятая при самовозбуждении. Электрические схемы соединений генератора для определения токоскоростных характеристик те же, что и для внешних характеристик.

Токоскоростная характеристика генератора $I_d=f(n)$ имеет значительную кривизну (рис. 1.20), так как с увеличением частоты вращения ротора n отдаваемый генератором ток I_d растет все медленнее. Это объясняется тем, что с увеличением частоты вращения ротора генератора увеличивается индуктивное сопротивление обмотки якоря генератора пропорциональное квадрату числа витков в фазе. Вследствие этого с увеличением частоты вращения ток генератора увеличивается медленнее, ассимптотически стремясь к некоторому предельному значению.

При замыкании внешней цепи на сопротивление нагрузки индуктированная в обмотке статора ЭДС E вызывает ток:

$$I_d = \frac{E}{\sqrt{(r+R)^2 + x^2}}, \tag{1.11}$$

где r – активное сопротивление обмоток статора;

R – сопротивление нагрузки;

x – индуктивное сопротивление обмотки якоря генератора.

$$x = 2\pi fL = 2\pi \frac{pn}{60} L = C_y n;$$

$$E = 4{,}44k\omega f\Phi_\delta = 4{,}44k\omega \frac{pn}{60}\Phi_\delta = C_x n\Phi_\delta. \tag{1.12}$$

где C_y и C_x – постоянные величины.

Подставляя в уравнение тока значения E и x, получим:

$$I_d = \frac{C_x n\Phi_\delta}{\sqrt{(r+R)^2 + C_y^2 n^2}}. \tag{1.13}$$

При малой частоте вращения ротора величина $C_y^2 n^2$ мала по сравнению с $(r+R)^2$ и ею можно пренебречь, тогда:

$$I_d = \frac{C_x\Phi_\delta}{\sqrt{(r+R)^2}} n = \frac{C_x\Phi_\delta}{r+R} n. \tag{1.14}$$

Как видно из формулы, ток при малой частоте вращения растет пропорционально частоте вращения (начальная часть характеристики на рис. 1.20).

При возрастании частоты вращения возрастает величина $C_y^2 n^2$ и при максимальной частоте вращения можно пренебречь значением $(r+R)^2$; тогда ток будет равен:

$$I_d = \frac{C_x\Phi_\delta}{\sqrt{(r+R)^2 + C_y^2 n^2}} = \frac{C_x\Phi_\delta}{C_y}, \tag{1.15}$$

т.е. ток будет равен какой-то постоянной величине, определяемой параметрами обмоток генератора и величиной магнитного потока холостого хода и не зависящей от n.

В зависимости от способа ограничения тока генератора различают два вида токоскоростных характеристик: с ограничителем тока в

схеме регулирования напряжения генератора и с самоограничением тока генератора. В первом случае, когда предельное значение тока генератора при большой частоте вращения больше, чем допустимо по нагреву, выпрямленный ток ограничивается автоматически посредством отдельного элемента – ограничителя тока, входящего в регулирующее устройство (рис. 1.20, *а*). Но это ведет к усложнению конструкции регулирующего устройства, что нежелательно по технико-экономическим и эксплуатационным соображениям. Для исключения из конструкции регулирующего устройства ограничителя тока, число витков обмотки статора увеличивают и подбирают таким образом, чтобы при увеличении частоты вращения ротора предельное значение тока не превышало допустимой по нагреву величины (рис. 1.20, *б*). Тогда ограничитель тока становится излишним. Так генератор приобретает свойство самоограничения отдаваемого им в нагрузку тока. Все современные автомобильные генераторы выполняются с самоограничением тока и имеют токоскоростную характеристику, соответствующую рис. 1.20, *б*.

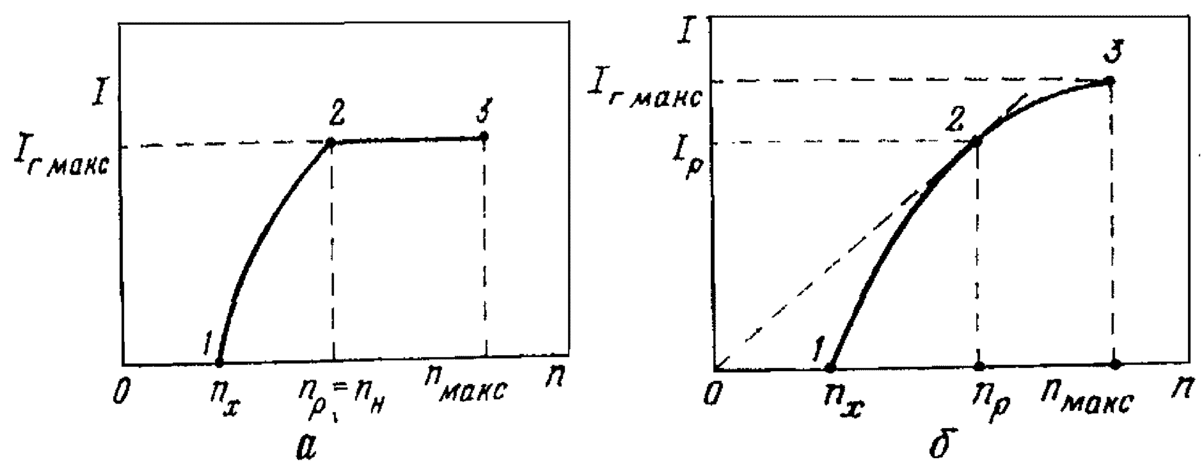


Рис. 1.20. Токоскоростные характеристики автомобильного генератора:
а – с ограничителем тока в схеме регулирования; б – с самоограничением тока

Также, различают токоскоростные характеристики в так называемом «холодном» и «горячем» состоянии генератора, которые экспериментально определяют следующим образом. Генератор устанавливают на стенде, имеющем электрический двигатель для привода ротора генератора, и приборы, соединенные по схеме, приведенной на рис. 1.18 или 1.19. В случае определения характеристики по схеме

рис. 1.19 (независимого возбуждения) сначала включают выключатель *В*1 и реостатом устанавливают напряжение возбуждения, равное номинальной величине (т. е. 14 или 28 В), После этого плавно приводят во вращение ротор генератора и тахометром или частотометром определяют начальную частоту вращения в режиме холостого хода, при которой выпрямленное напряжение достигает величины 14 или 28 В. Затем включают рубильник *В*2 и снимают характеристику, увеличивая частоту вращения и подбирая на каждой частоте вращения такое положение реостата нагрузки $R_н$, чтобы выпрямленное напряжение было равно номинальному напряжению 14 или 28 В. Характеристика, снятая таким образом, соответствует «холодному» состоянию.

Для определения токоскоростной характеристики в «горячем» состоянии генератор в комплекте с регулирующим устройством должен предварительно проработать на стенде в режиме нагрузки расчетным током при частоте вращения 3000–3500 об/мин в течение 1,5–2 ч, после чего снятие характеристик производится так же, как описано выше.

Под расчетным током I_{dp}, величина которого определяет размеры и массу генератора, подразумевают: в случае применения в схеме регулирования ограничителя тока – максимальный ток генератора, ограничиваемый ограничителем тока; в генераторе с самоограничением – величину тока нагрузки, равную примерно 2/3 от максимальной величины тока самоограничения генератора. Частоту вращения ротора генератора, соответствующую расчетному току нагрузки, называют расчетной частотой вращения n_p, а режим работы генератора при расчетном токе I_{dp} и расчетной частоте вращения n_p – расчетным режимом (или режимом максимального момента).

Параметры I_{dp} и n_p, характеризующие расчетный режим генератора с самоограничением тока, можно определить, проведя из начала координат касательную к токоскоростной характеристике (см. рис. 1.20, *б*). Тогда точка касания определяет величины I_{dp} и n_p.

Автомобильные генераторы рассчитаны таким образом, что узлы и детали генератора выдерживают тепловую нагрузку, соответству-

ющую любому режиму его работы. Поэтому на табличке генератора обозначают наряду с номинальной величиной напряжения (14 или 28 В) величину максимального тока нагрузки генератора. В случае применения ограничителя тока эта величина равна току, на который установлен ограничитель, а в случае генератора с самоограничением отдаваемого тока – максимальному току самоограничения.

Максимальная мощность генератора переменного тока определяется по соотношению:

$$P_{Г\max} = U_{dn} * I_{Г\max}, \tag{1.16}$$

где U_{dn} – номинальное выпрямленное напряжение, равное по ГОСТ Р 52230-2004 [6], соответственно 14 или 28 В;

$I_{Гmax}$ – ток нагрузки генератора в максимальном режиме.

Генераторы с номинальным напряжением 14 и 28 В предназначены для работы соответственно в системе электроснабжения автомобиля напряжением 12 и 24 В.

Для оценки использования материалов генератора применяется так называемый «коэффициент использования» (максимальный):

$$K_{\max} = \frac{P_{Г\max}}{G_Г}, \left(\frac{Вт}{кг}\right), \tag{1.17}$$

где $G_Г$ – масса генератора, кг (без шкива).

Однако масса электрических машин зависит не от их мощности, а от момента (т. е. мощности, деленной на частоту вращения). Поэтому пользоваться этим коэффициентом можно только для сравнения технического уровня генераторов с одинаковой или близкой частотой вращения ротора.

Для более объективной оценки технического уровня и совершенства расчета в смысле использования материалов генератора применяется удельный коэффициент использования, учитывающий различную частоту вращения:

$$K_{уд} = \frac{U_{dn} I_p}{G_Г n_p}, \left(\frac{Вт * мин}{кг}\right). \tag{1.18}$$

Удельный коэффициент использования при одинаковом использовании материалов генератора несколько увеличивается с увеличением их мощности, однако это увеличение в пределах колебания мощностей автомобильных генераторов невелико.

На практике в случаях, когда токоскоростная характеристика неизвестна и, следовательно, определить величину I_p и n_p нельзя, пользуются удельным коэффициентом использования по холостому ходу:

$$K_x = \frac{U_{dn} I_{\Gamma \max}}{G_\Gamma n_x} \left(\frac{Вт * мин}{кг} \right), \tag{1.19}$$

где n_x – начальная частота вращения при холостом ходе, которая обычно указывается в каталогах.

Этот коэффициент приблизительно пропорционален предыдущему и составляет величину $K_x = (2{,}8 \div 3{,}2) K_{уд}$.

В технических условиях на генераторы, как правило, указывают следующие параметры токоскоростной характеристики генераторов в «холодном» и «горячем» состояниях: начальную частоту вращения в режиме холостого хода n_x; расчетную частоту вращения ротора генератора n_p; максимальную частоту вращения ротора генератора n_{max}; максимальный ток нагрузки генератора I_{dmax}.

1.5. ПРИНЦИП РАБОТЫ РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время все генераторные установки оснащаются полупроводниковыми электронными регуляторами напряжения, как правило, встроенными внутрь генератора [1,2]. Схемы их исполнения и конструктивное оформление могут быть различны, но принцип работы у всех регуляторов одинаков. ЭДС генератора без регулятора зависит от частоты вращения ротора, величины магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения, а напряжение еще от величины тока, отдаваемого генератором потребителям. Чем больше частота вращения и сила тока возбуждения, тем больше напряжение генератора, чем больше величина тока нагрузки – тем меньше напряжение.

Регулятор напряжения поддерживает напряжение генератора при изменении частоты вращения и нагрузки за счет воздействия на ток возбуждения. Можно изменять ток возбуждения введением в цепь дополнительного сопротивления, но этот способ связан с потерей мощности и в электронных регуляторах не применяется. Электронные регуляторы изменяют ток возбуждения путем включения и отключения обмотки возбуждения от питающей сети, при этом меняется относительная продолжительность времени включения обмотки возбуждения. Если для стабилизации напряжения требуется уменьшить силу тока возбуждения, время включения обмотки возбуждения уменьшается, если нужно увеличить – увеличивается.

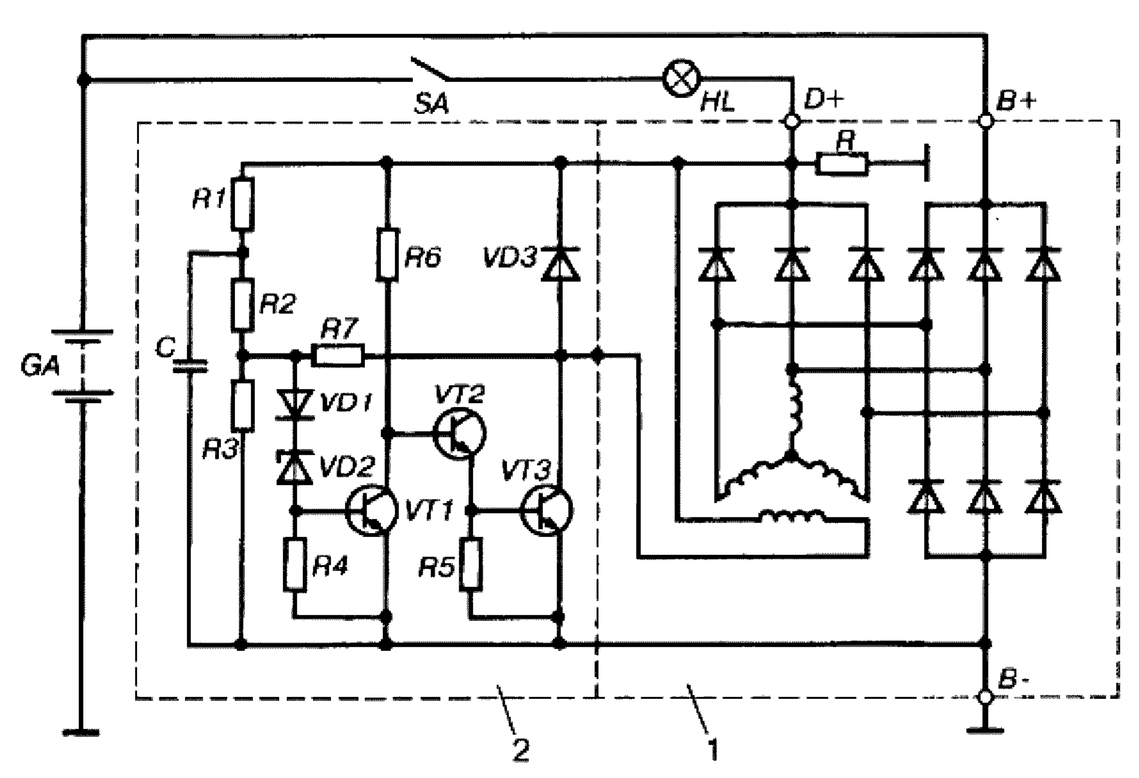


Рис. 1.21. Схема регулятора напряжения *EE* 14*V*3 фирмы *Bosch*:
1 – генератор, 2 – регулятор напряжения, *SA* – включатель зажигания,
HL – лампа контроля работоспособного состояния генераторной установки

Принцип работы электронного регулятора рассмотрим на достаточно простой схеме регулятора типа *EE* 14*V*3 фирмы *Bosch*, представленной на рис. 1.21. [1].

Стабилитрон не пропускает через себя ток при напряжениях ниже величины напряжения стабилизации. При достижении напряжени-

ем этой величины стабилитрон «пробивается» и по нему начинает протекать ток. Таким образом, стабилитрон в регуляторе является эталоном напряжения, с которым сравнивается напряжение генератора. Кроме того, известно, что транзисторы пропускают ток между коллектором и эмиттером, т. е. открыты, если в цепи «база – эмиттер» ток протекает, и не пропускают этого тока, т. е. закрыты, если базовый ток прерывается. Напряжение к стабилитрону *VD*2 подводится от вывода генератора «*D*+» через делитель напряжения на резисторах *R*1–*R*3 и диод *VD*1, осуществляющий температурную компенсацию. Пока напряжение генератора невелико и напряжение на стабилитроне ниже его напряжения стабилизации, стабилитрон закрыт, через него и в базовой цепи транзистора *VT*1 ток не протекает, транзистор *VT*1 также закрыт. В этом случае ток через резистор *R*6 от вывода «*D*+» поступает в базовую цепь транзистора *VT*2, который открывается, через его переход «эмиттер – коллектор» начинает протекать ток в базе транзистора *VT*3, который также открывается. При этом обмотка возбуждения генератора оказывается подключена к цепи питания через переход «эмиттер – коллектор» *VT*3. Соединение транзисторов *VT*2 и *VT*3, при котором их коллекторные выводы объединены, а питание базовой цепи одного транзистора производится от эмиттера другого, называется схемой Дарлингтона. При таком соединении оба транзистора могут рассматриваться как один составной транзистор с большим коэффициентом усиления. Обычно такой транзистор выполняется на одном кристалле кремния. Если напряжение генератора возросло, например, из-за увеличения частоты вращения его ротора, то возрастает и напряжение на стабилитроне *VD*2, при достижении этим напряжением величины напряжения стабилизации стабилитрон *VD*2 «пробивается», ток через него начинает поступать в базовую цепь транзистора *VT*1, который открывается и своим переходом «эмиттер – коллектор» соединяет вывод базы составного транзистора *VT*2, *VT*3 на «массу». Составной транзистор закрывается, разрывая цепь питания обмотки возбуждения. Ток возбуждения спадает, уменьшается напряжение генератора, закрываются стабилитрон *VT*2, транзистор

*VT*1, открывается составной транзистор *VT*2, *VT*3, обмотка возбуждения вновь включается в цепь питания, напряжение генератора возрастает, и процесс повторяется. Таким образом, регулирование напряжения генератора регулятором осуществляется дискретно через изменение относительного времени включения обмотки возбуждения в цепь питания. При этом ток в обмотке возбуждения изменяется так, как показано на рис. 1.22. Если частота вращения генератора возросла или нагрузка его уменьшилась, время включения обмотки уменьшается, если частота вращения уменьшилась или нагрузка возросла – увеличивается. В схеме регулятора (см. рис. 1.21.) имеются элементы, характерные для схем всех применяющихся на автомобилях регуляторов напряжения. Диод *VD*3 при закрытии составного транзистора *VT*2, *VT*3 предотвращает опасные всплески напряжения, возникающие из-за обрыва цепи обмотки возбуждения со значительной индуктивностью. В этом случае ток обмотки возбуждения может замыкаться через этот диод и опасных всплесков напряжения не происходит. Поэтому диод *VD*3 носит название гасящего. Сопротивление *R*7 является сопротивлением жесткой обратной связи. При открытии составного транзистора *VT*2, *VT*3 оно оказывается подключенным параллельно сопротивлению *R*3 делителя напряжения, при этом напряжение на стабилитроне *VT*2 резко уменьшается, это ускоряет переключение схемы регулятора и повышает частоту этого переключения, что благотворно сказывается на качестве напряжения генераторной установки. Конденсатор *C*1 является своеобразным фильтром, защищающим регулятор от влияния импульсов напряжения на его входе. Вообще конденсаторы в схеме регулятора либо предотвращают переход этой схемы в колебательный режим и возможность влияния посторонних высокочастотных помех на работу регулятора, либо ускоряют переключение транзисторов. В последнем случае конденсатор, заряжаясь в один момент времени, разряжается на базовую цепь транзистора в другой момент, ускоряя броском разрядного тока переключение транзистора и, следовательно, снижая его нагрев и потери энергии в нем.

Из рис. 1.21 хорошо видна роль лампы *HL* контроля работоспособного состояния генераторной установки. При неработающем двигателе автомобиля замыкание контактов выключателя зажигания *SA* позволяет току от аккумуляторной батареи *GA* через эту лампу поступать в обмотку возбуждения генератора. Этим обеспечивается первоначальное возбуждение генератора. Лампа при этом горит, сигнализируя, что в цепи обмотки возбуждения нет обрыва. После запуска двигателя, на выводах генератора «*D*+» и «*B*+» появляется практически одинаковое напряжение, и лампа гаснет. Если генератор при работающем двигателе автомобиля не развивает напряжения, то лампа HL продолжает гореть и в этом режиме, что является сигналом об отказе генератора или обрыве приводного ремня.

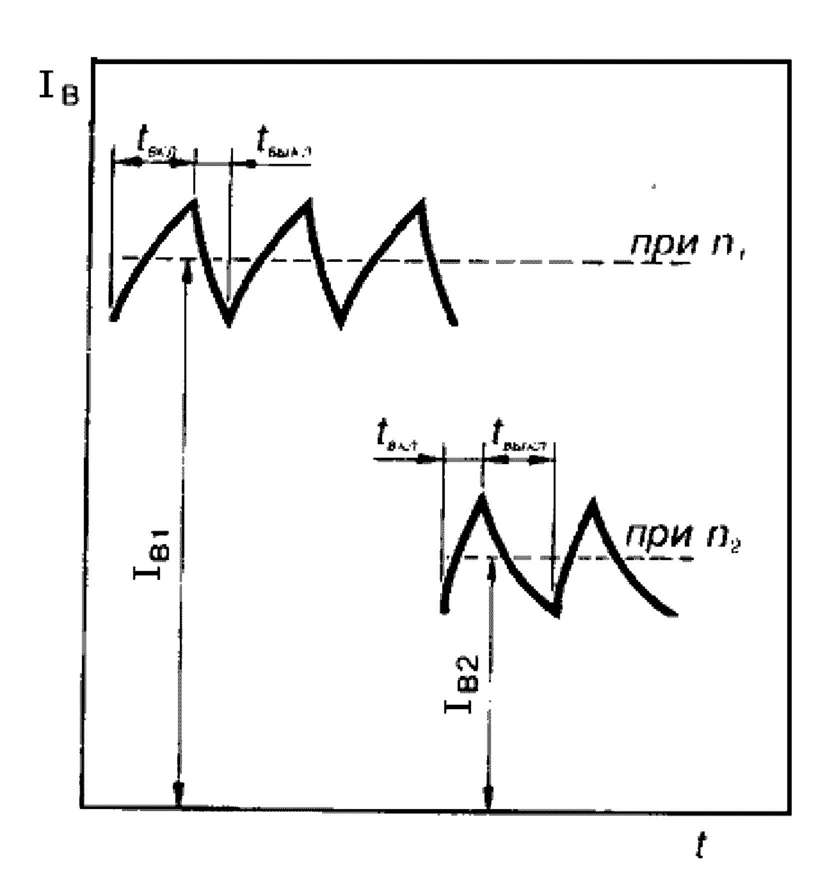


Рис. 1.22. Изменение силы тока в обмотке возбуждения I_B по времени t при работе регулятора напряжения:
$t_{вкл}$, $t_{выкл}$ – соответственно время включения и выключения обмотки возбуждения регулятора напряжения; $n1$, $n2$ – частоты вращения ротора генератора, $n2$ больше $n1$; I_{B1} и I_{B2} – средние значения силы тока в обмотке возбуждения

Введение резистора *R* в генераторную установку способствует расширению диагностических способностей лампы *HL*. При наличии этого резистора в случае обрыва цепи обмотки возбуждения при работающем двигателе автомобиля лампа *HL* загорается.

В настоящее время все больше фирм переходит на выпуск генераторных установок без дополнительного выпрямителя обмотки возбуждения. В этом случае в регулятор заводится вывод фазы генератора. При неработающем двигателе автомобиля напряжение на выводе фазы генератора отсутствует и регулятор напряжения в этом случае переходит в режим, препятствующий разряду аккумуляторной батареи на обмотку возбуждения. Например, при включении выключателя зажигания схема регулятора переводит его выходной транзистор в колебательный режим, при котором ток в обмотке возбуждения невелик и составляет доли ампера. После запуска двигателя сигнал с вывода фазы генератора переводит схему регулятора в нормальный режим работы. Схема регулятора осуществляет в этом случае и управление лампой контроля работоспособного состояния генераторной установки.

Аккумуляторная батарея для своей надежной работы требует, чтобы с понижением температуры электролита напряжение, подводимое к батарее от генераторной установки, несколько повышалось, а с повышением температуры – уменьшалось. Для автоматизации процесса изменения уровня поддерживаемого напряжения применяется датчик, помещенный в электролит аккумуляторной батареи и включенный в схему регулятора напряжения. В простейшем случае термокомпенсация в регуляторе подобрана таким образом, что в зависимости от температуры поступающего в генератор охлаждающего воздуха напряжение генераторной установки изменяется в заданных пределах. На рис. 1.23 показана температурная зависимость напряжения, поддерживаемая регулятором *EE*14*V*3 фирмы *Bosch* в одном из рабочих режимов. На графике указано также поле допуска на величину этого напряжения.

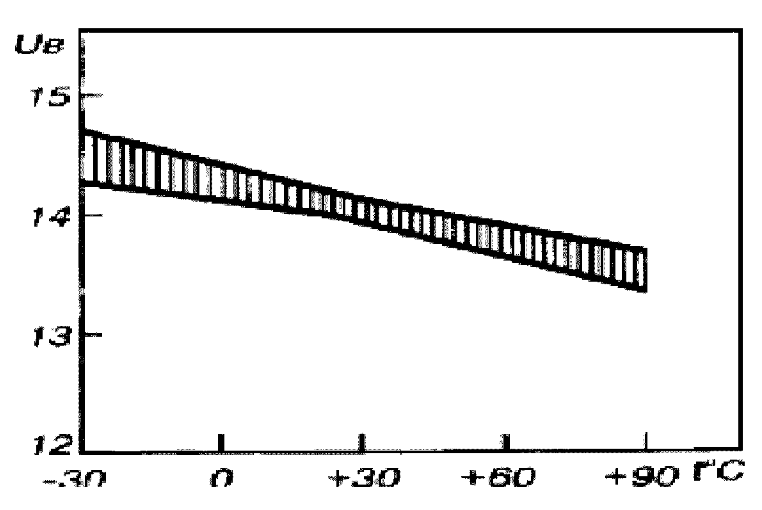


Рис. 1.23. Температурная зависимость напряжения, поддерживаемого регулятором *EE14V3* фирмы *Bosch* при частоте вращения 6000 мин $^{-1}$ и силе тока нагрузки 5 А

Падающий характер зависимости обеспечивает хороший заряд аккумуляторной батареи при отрицательной температуре и предотвращение усиленного выкипания ее электролита при высокой температуре. По этой же причине на автомобилях, предназначенных специально для эксплуатации в тропиках, устанавливают регуляторы напряжения с заведомо более низким напряжением настройки, чем для умеренного и холодного климатов.

1.6. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК.

Принципиальные электрические схемы генераторных установок приведены на рис. 1.24 [2].

У генераторных установок имеются выводы с блока выпрямителей (плюс и минус), вывод обмотки возбуждения, вывод для соединения с лампой контроля заряда аккумулятора, вывод фазы и нулевой точки обмотки статора, вывод регулятора напряжения для подсоединения его в бортовую сеть, вывод регулятора напряжения для соединения его с бортовым компьютером. Количество выводов и их обозначение на электрических схемах зависят от типа и фирмы-производителя генератора, регулятора напряжения и автомобиля, на котором они установлены. Вывод плюс блока выпрямителей может обозначаться «+», *B*, 30, *B*+, *BAT*. Вывод минус – «-», *D*-, 31, *B*-, *M*, *E*,

GRD. Вывод обмотки возбуждения обозначается Ш, 67, DF, F, EXC, E, *FLD*. Вывод для соединения с лампой контроля заряда аккумулятора обозначается *D*, *D*+, 61, *L*, *WL*, *IND*, *E*, *FLD*. Вывод фазы обмотки статора – *W*, *R*, *STA*. Вывод нулевой точки обмотки статора – 0, Мр. Вывод регулятора напряжения для подсоединения его в бортовую сеть – Б, 15, *S*. Вывод регулятора напряжения для соединения его с бортовым компьютером – *FR*, *F*.

Существует два типа регуляторов напряжения. В одном типе регулятора напряжения (рис. 1.24, *а*) выходной коммутирующий транзистор соединяет вывод обмотки возбуждения генератора с плюсом бортовой сети, в другом типе (рис. 1.24, *б*, *в*) – с минусом бортовой сети. Транзисторные регуляторы напряжения первого и второго типа являются не взаимозаменяемыми.

Для предотвращения разряда аккумуляторной батареи при выключенном двигателе цепь обмотки возбуждения генератора (в схемах рис. 1.24, *а*, *б*) подключается через выключатель зажигания, контакты которого коммутируют ток до 5А. Чтобы разгрузить контакты выключателя и продлить срок их эксплуатации, используют промежуточное реле, или через выключатель зажигания запитывают только цепь управления регулятора напряжения (рис. 1.24, *в*), потребляющую ток силой в миллиамперы. Прерывание тока в цепи управления переводит регулятор в выключенное состояние. Следует отметить, что падение напряжения в выключателе зажигания и других коммутирующих или защитных элементах, включенных в цепь регулятора, влияет на качество напряжения и частоту переключения выходного транзистора регулятора, что может привести к миганию ламп, колебанию стрелок вольтметра и амперметра. Для устранения этого недостатка обмотка возбуждения подключается к дополнительному выпрямителю (схема на рис. 1.24, *д*). Схема допускает некоторый разряд аккумуляторной батареи малыми токами по цепи регулятора напряжения.

Для возбуждения генератора от аккумуляторной батареи и контроля работоспособности генераторной установки в схему, представленную на рис. 1.24, *д*, введена контрольная лампа 8. Небольшой ток,

поступающий в обмотку возбуждения через эту лампу от аккумуляторной батареи, достаточен для возбуждения генератора и существенно не влияет на разряд аккумуляторной батареи. Обычно параллельно контрольной лампе включают резистор 13, чтобы даже в случае перегорания контрольной лампы генератор мог возбудиться. В схеме установлен стабилитрон 12, гасящий пики перенапряжения, опасные для электронной аппаратуры.

Для контроля работы генераторной установки в схеме, изображенной на рис. 1.24, *а*, установлено реле с размыкающими контактами, через которые получает питание контрольная лампа 8. Контрольная лампа загорается при включении зажигания и гаснет после пуска двигателя, если в обмотках генератора наводится ЭДС. В этом случае под действием напряжения от генератора реле включается и разрывает свои контакты в цепи питания контрольной лампы 8. Горящая лампа 8 при работающем двигателе означает, что генераторная установка неисправна. Обмотка реле контрольной лампы 6 может подключаться к выводу фазы генератора.

Схема, представленная на рис. 1.24, *е*, используется для подключения генераторных установок с номинальным напряжением 28 В. В этом случае обмотка возбуждения соединяется с нулевой точкой обмотки статора генератора, и она питается меньшим напряжением, чем напряжение генератора. При меньшем напряжении питания обмотки возбуждения и величины импульсов напряжения, возникающих при работе генераторной установки, снижаются, что повышает надежность работы полупроводниковых элементов регулятора напряжения. Сопротивление 13 служит для надежного возбуждения генератора при пуске двигателя внутреннего сгорания.

На некоторых автомобилях с дизельными двигателями применяется генераторная установка на два уровня напряжения: 14 и 28 В. Напряжение 28 В используется для зарядки аккумуляторной батареи, питающей электростартерную систему пуска двигателя внутреннего сгорания. Для получения напряжения 28 В применяется электронный удвоитель напряжения или трансформаторно-выпрямительный блок.

Электрическая схема с трансформаторно-выпрямительным блоком показана на рис. 1.24, *г*. В системе на два уровня напряжения стабилизируется только первый уровень напряжения 14 В. Уровень напряжения 28 В получается за счет трансформации и последующего выпрямления в трансформаторно-выпрямительном блоке генератора. Коэффициент трансформации трансформатора трансформаторно-выпрямительного блока равен примерно единице.

Схема, представленная на рис. 1.24, *ж*, несколько отличается от схемы на рис. 1.24, *д*. В ней устранен недостаток предыдущей – разряд аккумуляторной батареи регулятором напряжения при длительной стоянке автомобиля с выключенным двигателем внутреннего сгорания. В этой же схеме (рис. 1.24, *ж*) в блоке выпрямителей вместо кремниевых диодов применяются стабилитроны на напряжение около 30 В. Стабилитроны в прямом направлении работают как обычные выпрямительные диоды, а в обратном направлении пробиваются и срезают опасные пики перенапряжения. Сопротивление *R* установлено для диагностических целей. Это сопротивление наиболее часто устанавливается в генераторных установок фирмы *Bosch*.

В схеме генераторной установки без дополнительного выпрямителя, но с подводом к регулятору напряжения вывода фазы (рис. 1.24, *з*), усложняется схема регулятора напряжения, так как на него переносятся функции предотвращения разряда аккумуляторной батареи при неработающем двигателе на цепь возбуждения и управления лампой контроля работоспособного состояния генераторной установки. Эта схема в последнее время стала чаще применяться японскими и американскими фирмами.

На вход регулятора напряжения может подаваться как напряжение с выпрямительного блока генератора, так и с аккумуляторной батареи (пунктир на рис. 1.24, *з*), а иногда и оба эти напряжения сразу.

Стабилитрон 12, защищающий от пиков перенапряжения дополнительное плечо выпрямителя, и применение стабилитронов в блоке выпрямителей может быть использовано в любой из приведенных схем.

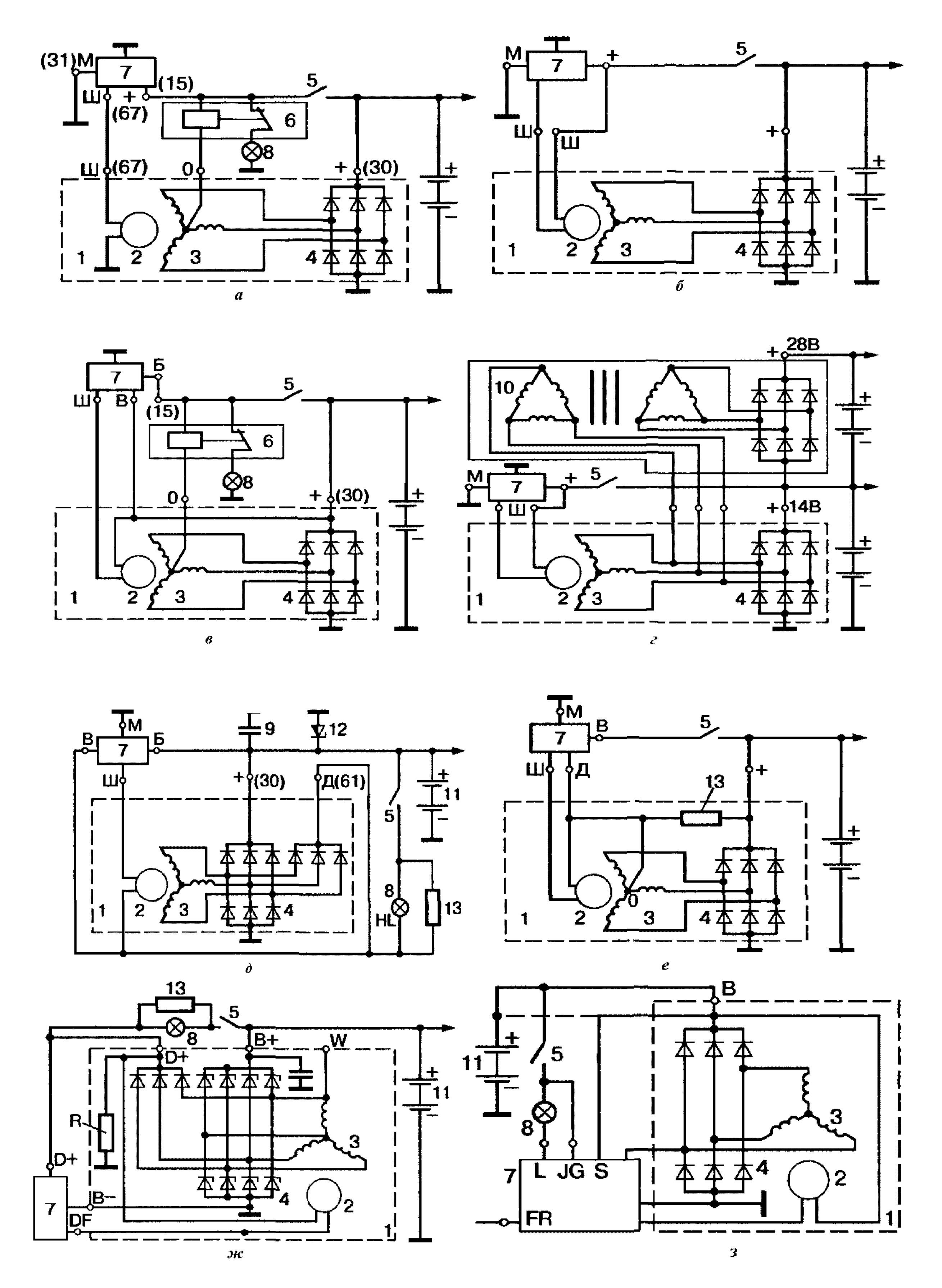


Рис. 1.24. Схемы генераторных установок:
1 – генератор; 2 – обмотка возбуждения; 3 – обмотка якоря; 4 – блок выпрямителей;
5 – выключатель зажигания; 6 – реле; 7 – регулятор напряжения; 8 – контрольная лампа;
9 – конденсатор для подавления радиопомех; 10 – трансформаторно-выпрямительный блок;
11 – аккумуляторная батарея; 12 – стабилитрон; 13 – сопротивление

Контрольную лампу некоторые фирмы включают через разделительный диод или в схему вместо контрольной лампы устанавливают реле, включающее контрольную лампу. Для контроля режима работы аккумуляторной батареи могут устанавливаться датчики температуры электролита, а регуляторы напряжения генератора могут снабжаться дополнительным вводом с этих датчиков.

В блоках выпрямителей генераторов большой мощности может применяться параллельное включение диодов выпрямителя, но не указываться на схеме.

С целью повышения полезной мощности генераторной установки в блоке выпрямителей можно установить два дополнительных диода для выпрямления высших гармонических составляющих фазного напряжения кратных трем (схема на рис. 1.24, *ж*).

Цепи генераторной установки от перегрузки и коротких замыканий обычно защищаются предохранителями, устанавливаемых в соответствующих цепях.

1.7. ТРЕБОВАНИЯ К АВТОМОБИЛЬНЫМ ГЕНЕРАТОРАМ

Обозначение генератора и регулятора напряжения рядом цифр определяет их порядковый номер модели, модификацию, исполнение и назначение. Обозначение элементов генераторной установки производится по схеме:

хххх. 3701-генератор;

хххх. 3702-регулятор напряжения.

На месте значков «х» в обозначении ставятся цифры от 0 до 9. Первые две цифры обозначают порядковый номер модели, третья цифра – модификацию изделия, четвертая цифра – исполнение (1 – для холодного климата, 2 – общеклиматическое исполнение, 3 – для умеренного и тропического климата, 6 – экспортное исполнение, 7 – тропическое исполнение, 8 – экспортное исполнение для стран с холодным климатом, 9 – экспортное общеклиматическое исполнение). Цифры до точки, кроме первых двух, могут опускаться.

Генераторные установки должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 52230-2004 «Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия» [6].

Номинальная мощность генератора – это максимальная полезная мощность, измеряемая в ваттах, равная произведению номинального напряжения на максимальный ток.

Для электрооборудования номинальный режим работы S1 – это продолжительный режим работы с номинальной нагрузкой. За время работы в этом режиме превышение температуры всех частей электрической машины, аппарата или прибора достигает практически установившихся значений при неизменной температуре окружающей среды.

Номинальный режим работы S2 – это кратковременный режим при неизменной номинальной нагрузке с периодами отключения. В периоды нагрузки превышения температуры всех частей электрической машины, аппарата или прибора не достигают практически установившихся значений, а в периоды отключения все части охлаждаются до практически холодного состояния.

Номинальный режим S3 это повторно-кратковременный режим работы который характеризуется продолжительностью включения ПВ, измеряемой в процентах.

$$ПВ = \frac{t}{t + t_1} \cdot 100, \quad (1.20)$$

где t – время работы, мин; t_1 - пауза, мин.

Электрооборудование автомобилей изготавливается с соблюдением требований стандартов на изделия конкретного вида по утвержденной в установленном порядке конструкторской документации (КД).

Номинальные значения параметров изделий электрооборудования должны обеспечиваться при нормальных значениях климатических факторов внешней среды: температуре окружающего воздуха (25 ± 10) °С; относительной влажности от 45 % до 80 %; атмосферном давлении от 84,0 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт. ст.).

Номинальные параметры изделий электрооборудования автомобилей и тракторов в условиях, отличных от нормальных, допускается

изменять на значения, которые оговорены в соответствующих стандартах или КД на изделия электрооборудования конкретного вида.

Номинальное напряжение для генераторов и генераторных установок должно быть равно: 7, 14, 28 В.

Электрооборудование автомобилей и тракторов конструируется для работы по однопроводной схеме. Как правило, с корпусом машины соединены отрицательные выводы источников питания. В отдельных случаях по требованию заказчика допускается изготавливать изделия, у которых от корпуса изолированы оба электрических вывода.

Стандартом определено, что направление вращения валов генераторов с одним выходящим концом вала определяют со стороны приводного конца вала.

Электрооборудование и приборы автомобилей и тракторов изготавливают для различных климатических районов. Климатические исполнения условно обозначаются буквами:

– У – для умеренного климата;

– ХЛ – для холодного климата;

– Т – для тропического климата;

– О – общеклиматическое исполнение.

Автомобильные генераторы могут выпускаться для эксплуатации в нескольких макроклиматических районах.

Степень защиты генератора от проникновения посторонних тел и воды указывается в стандартах или КД на генератор конкретного вида.

Генераторы автомобилей и тракторов изготавливают для работы в продолжительном номинальном режиме – S1.

Уровень и способ подавления радиопомех для электрооборудования автомобилей и тракторов, создающих радиопомехи, указывают в стандартах или КД на изделия конкретного вида.

Электромагнитная совместимость генераторов автомобилей и тракторов по кондуктивным помехам в бортовых сетях и устойчивости к помехам в контрольных и сигнальных бортовых цепях от емкостных и индуктивных соединений должна соответствовать требованиям стандартов.

Электрооборудование автомобилей должно сохранять работоспособность при эксплуатации при температуре окружающей среды, указанной в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Допустимая температура окружающей среды

Вид электрооборудования	Температура окружающей среды, °С, для электрооборудования исполнений		
	У	ХЛ	Т
Электрооборудование, устанавливаемое на двигателе и в моторном отделении	Максимальная рабочая, выбираемая из ряда: 70, 80, 90, 100, 120		
Электрооборудование, устанавливаемое в кабине, закрытом кузове и снаружи	Максимальная рабочая 55, Предельная 65		
Электрооборудование, устанавливаемое снаружи, в кабине, закрытом кузове, или то, которое должно работать до предпускового подогрева двигателя	Минимальная рабочая – минус 45. Предельная – минус 50	Минимальная рабочая – минус 60. Предельная – минус 60	Минимальная рабочая – минус 20. Предельная – минус 45
Электрооборудование, устанавливаемое на двигателе и в моторном отделении и включаемое только после предпускового подогрева	Минус 40		Минус 20

Электрооборудование климатического исполнения О должно удовлетворять требованиям ГОСТ Р 52230-2004 «ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ АВТОТРАКТОРНОЕ. Общие технические условия» [6], а пригодное для эксплуатации в нескольких макроклиматических районах – требованиям, предусмотренным для соответствующих районов.

Электрооборудование и приборы автомобилей и тракторов должно сохранять работоспособность после пребывания в неработающем состоянии при температуре минус 60 °С для исполнения ХЛ, минус 50 °С для исполнения У и минус 45 °С для исполнения Т во время транспортирования и нерабочих периодов автомобиля, на котором они установлены.

Электрооборудование автомобилей и тракторов испытывают при максимальном и минимальном значениях рабочих температур. В слу-

чае необходимости электрооборудование конкретного вида может испытываться по указаниям КД по предельным температурам.

Электрооборудование исполнений У и ХЛ должно выдерживать воздействие влажной тепловой среды в течение 4 суток. При температуре (40 ± 2) °С и относительной влажности (95 ± 3) %.

Электрооборудование исполнений Т и О на влагоустойчивость испытываются по соответствующим стандартам.

Электрооборудование должно работать при снижении атмосферного давления до 61 кПа (457,5 мм. рт. ст.), что соответствует давлению на высоте 4000 м над уровнем моря.

Изделия, поставленные на производство после 01.01.85, предназначенные для грузовых автомобилей для работы на высоте до 4650 м над уровнем моря, должны функционировать при снижении атмосферного давления до 57 кПа (427,5 мм. рт. ст.), что соответствует давлению на высоте 4650 м.

Требования на электрооборудование конкретного вида к минимальному атмосферному давлению при необходимости устанавливают в стандартах или КД.

Все электрооборудование должно выдерживать испытания на электрическую прочность изоляции обмоток и токоведущих деталей относительно металлического корпуса или основания.

Испытание изоляции обмоток и токоведущих деталей относительно корпуса или основания осуществляют воздействием практически синусоидального переменного тока частотой 50 Гц. Действующее значение испытательного напряжения для обмоток электрических машин равно 550 В. Изоляция обмоток и токоведущих деталей относительно корпуса или основания должна выдерживать без повреждений испытание в течение 1 мин.

Электрические машины, имеющие скользящие контакты, проверяются на степень искрения (класс коммутации). Степень искрения электрических машин должна быть не более 1,5 для электрических машин продолжительного режима работы S1 и 2 для электрических машин повторно-кратковременного S3 и кратковременного режимов работы S2.

Предельно допустимое превышение температуры частей электрооборудования различного назначения автомобилей зависит от класса изоляции. Предельно допустимое превышение температуры частей электрооборудования продолжительного и повторно-кратковременного режимов работы представлены в табл. 1.2.

Электрооборудование автомобилей должно сохранять работоспособность и не иметь повреждений и поломок после действия вибрационных и ударных нагрузок, представленных в табл. 1.3. Для электрооборудования, размещаемого на двигателях, мотоциклах, и для светотехнической аппаратуры, для которых требования к вибропрочности, представленные в табл. 1.3, не обеспечивают работоспособность более жесткие требования к вибропрочности указывают в стандартах или КД на электрооборудование конкретного вида.

Таблица 1.2

Предельно допустимое превышение температуры

Наименование частей электрических машин и аппаратов	Предельно допустимое Превышение температуры, °C, для классов изоляции				
	A	E	B	F	H
1. Обмотки автомобильных и тракторных электрических машин			125	140	
2. Коллекторы и контактные кольца			145	155	
3. Обмотки электрических аппаратов и регуляторов напряжения	100	115	130	145	160

Примечание. Предельно допустимое превышение температуры частей электрооборудования соответствует эксплуатации при максимальной рабочей температуре окружающей среды 70 °C.

Электрические машины, распределители зажигания и магнето испытывают при повышенной частоте вращения. Электрооборудование с режимом работы менее 1 мин должно выдерживать без повреждения испытание на повышенную частоту вращения на холостом ходу в течение 20 с, остальные электрические машины, распредели-

тели зажигания и магнето – в течение 2 мин. Величина испытательной частоты вращения для генераторов и электродвигателей привода должна быть на 20 % выше максимальной частоты вращения, рассчитанной по максимальной частоте вращения двигателя.

Таблица 1.3

Нормы испытаний на вибропрочность

Место установки электрооборудования	Вид нагрузки	Частота вибрации, Гц		Максимальное ускорение или замедление см/с^2	Продолжительность испытаний
		При периодических испытаниях	При типовых испытаниях		
1. Устанавливаемое на двигателе	Ударная			150	10000 ударов
	Вибрационная	50	50-250	100	8 ч
2.Остальное электрооборудование	Ударная			100	10000 ударов
	Вибрационная	50	50-250	50	8 ч

Примечания.

1. Допускается устанавливать продолжительность испытаний на вибрацию в циклах и указывать в стандартах или КД на изделия конкретного вида.

2. Для изделий, устанавливаемых вне двигателя, допускается частота вибрации 50-120 Гц при типовых испытаниях.

Электрооборудование автомобилей и тракторов следует защищать от коррозии лакокрасочными, металлическими и неметаллическими неорганическими покрытиями или их сочетаниями и другими способами. Разрешается изготавливать без защиты от коррозии детали магнитопроводов, которые находятся внутри изделия, части, которые работают в смазочном материале, контакты, латунные и бронзовые детали световых и других аппаратов.

Допускается не наносить защитные покрытия на посадочные места, места стыков изделий, внутренние поверхности корпусов колпаков и крышек, на места контактирования токоведущих пружин.

Различные пружины и пружинные шайбы, не работающие в смазочном материале, крепежные детали и элементы допускается защищать от коррозии оксидированием.

1.8. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

Повышение технического уровня и потребительских качеств современного автомобиля, а также соблюдение жестких требований к экологическим аспектам его эксплуатации, невозможно без широкого применения электромеханических и электронных систем. Как показывают практика и специализированные исследования, число электромеханических и электронных систем на автомобилях возрастает в среднем на 6-8 % в год, а рост мощности потребителей электрической энергии от генераторной установки увеличивается в среднем в 2 раза каждые 5-6 лет [5].

К тому же, в области систем электроснабжения в последнее время наблюдается расширение применения систем с характеристиками «*Longlife*» и «*Heavy-Duty*» со сроком службы 300000 км пробега без обслуживания [7,10].

Учитывая вышесказанное, можно выделить следующие направления развития автомобильных генераторных установок:

– применение более совершенных электрических и магнитных схем с мультиплексными системами и электронными элементами интегрального типа;

– применение новых конструктивных решений, направленных на повышение частоты вращения ротора генераторной установки;

– повышение эффективности охлаждения обмоток и основных элементов;

– оптимизация параметров генераторной установки и ее элементов, повышение напряжения;

– применение новых конструктивных и основных материалов на основе разработки эффективных технологий их изготовления;

– разработка и совершенствование методик расчета и проектирования автомобильных генераторных установок.

Можно выделить некоторые варианты конструктивных и технологических решений, позволяющих повысить удельные показатели, а также снизить начальные обороты автомобильной генераторной установки [5]:

– закрытые подшипники и щеточно-коллекторный узел, в который входит твердотельный регулятор напряжения с адаптивным алгоритмом и со встроенным стабилитроном защиты;

– запас по тепловому режиму генераторной установки за счет запаса по мощности и более интенсивного охлаждения внутренней полости внутренними встроенными вентиляторами и сдвоенными обмотками статора;

– особо точное изготовление полюсов магнитопровода статора и ротора;

– применение в выпрямителе диодов со стабилитронным эффектом;

– оптимизация размеров магнитной системы и обмоток статора при увеличении тока нагрузки;

– конструктивные особенности крышек и посадочных мест под подшипники;

– применение антишумовых конструктивных элементов (немагнитные кольца, форма полюсных наконечников и т.д.);

– увеличение передаточного отношения;

– применение новых материалов для контактных колец, щеток, каркаса обмотки возбуждения, изоляционных покрытий.

Отметим также, что при выборе новых конструкторских решений и новых технологий изготовления следует учитывать следующие обстоятельства:

– генераторные установки должны быть адаптированы с собственными производственными базами, обладать свойствами конструктивной и технологической преемственности с выпускаемой продукцией;

– технико-экономические и энергетические показатели должны находиться на уровне лучших отечественных и зарубежных аналогов;

– разрабатываемые генераторные установки должны иметь приемлемый рынок сбыта.

Таким образом, развитие конструкций автомобильной генераторной установки идет в направлениях повышения технического уровня изделия, применения новых принципов конструирования и нетрадиционных материалов, комплектующих, а также новых технологических процессов и оборудования.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие конструкции генераторов переменного тока автотракторного назначения применяются в настоящее время?
2. Каков принцип действия автомобильного вентильного генератора с контактными кольцами и клювообразным ротором?
3. В связи с какими физическими причинами вентильные генераторы автотракторного назначения обладают свойством токоограничения?
4. Каким образом происходит процесс регулирования напряжения генератора?
5. Какой вид имеют кривые выпрямленного напряжения и тока вентильного генератора?
6. Каковы условия эксплуатации и основные технические требования, предъявляемые к вентильным генераторам автотракторного назначения?
7. Каковы основные тенденции развития современных генераторов автотракторного назначения?
8. Какие типовые схемы силовой части автомобильного вентильного генератора применяются на современных автомобилях?

2. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЬНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

В процессе проектирования любой электрической машины (ЭМ) разрабатывается расчётная и конструкторская документация, на основании которой можно приступить к изготовлению опытных образцов. По результатам испытания этих образцов в методику расчёта ЭМ могут быть внесены требуемые корректировки, а в дальнейшем начата подготовка к серийному производству машины.

Методика расчёта ЭМ конкретного типа включает в себя и учитывает все современные достижения электромеханики: математические модели, т.е. математическое описание физических процессов, происходящих в машине; накопленный опыт производства и исследования и т.д.

Расчётная часть проекта ЭМ обычно содержит следующие виды расчётов:

– электромагнитный расчёт, целью которого является определение геометрических размеров элементов активной зоны, обмоточных данных и ожидаемых характеристик машины;

– тепловой расчёт, целью которого является определение превышения температуры обмоток и сердечников машины над температурой окружающей среды и их сопоставление с уровнем, допустимым для выбранного класса нагревостойкости изоляционных материалов;

– вентиляционный (или гидравлический) расчёт, целью которого является определение расхода охлаждающей среды, размеров нагнетателя (вентилятора, компрессора или насоса) и затрат мощности на искусственное движение охлаждающей среды;

– механический расчёт, целью которого является определение механического напряжения и деформаций деталей, наиболее нагруженных в механическом отношении, и их сопоставление с допустимым уровнем.

Как правило, для ЭМ как общепромышленного, так и специального назначения, наиболее трудоёмким является выполнение электромагнитного расчёта.

Так как числовые значения расчётно-конструктивных величин выбираются в соответствии с рекомендациями апробированных методик, то превышения температуры сердечников и обмоток статора и ротора, а также механические напряжения и деформации конструктивных элементов ротора будут находиться в допустимых пределах. Поэтому тепловой, вентиляционный и механический расчёты вентильного автомобильного генератора (ВАГ) в настоящем учебном пособии не приводятся.

Анализ методик, излагаемых в [3, 4, 8, 9], показал, что все вычисления, производимые в ходе электромагнитного расчёта ВАГ, можно подразделить на следующие тринадцать этапов.

1. Определение электрических величин на стороне постоянного тока.
2. Определение электрических величин на стороне переменного тока.
3. Выбор числа витков в фазе обмотки статора.
4. Расчёт главных размеров генератора.
5. Проектирование статора.

На этом этапе целесообразно выделить следующие подразделы:

– расчёт размеров провода обмотки статора;

– расчёт размеров сердечника статора в его поперечном сечении;

– определение массы конструктивных элементов статора.

6. Проектирование ротора с клювообразными полюсами.

На этом этапе целесообразно выделить следующие подразделы:

– определение размеров элементов магнитной цепи индуктора;

– предварительный расчёт обмотки возбуждения;

– детальная проверка размещения катушки обмотки возбуждения в прямоугольной части окна индуктора;

– определение магнитной проводимости для путей рассеяния магнитного потока индуктора;

– расчёт магнитной цепи в режиме идеального холостого хода;

– окончательный расчёт обмотки возбуждения;

– расчёт размеров щёток и контактных колец;

– определение массы конструктивных элементов ротора.

7. Расчёт характеристики холостого хода.

8. Определение параметров генератора.

9. Проверка соответствия техническому заданию частоты вращения ротора в режиме максимальной нагрузки.

10. Расчёт токоскоростной характеристики.

11. Определение энергетических показателей генератора в режиме максимальной нагрузки.

12. Расчёт мощности потерь и коэффициента полезного действия генератора.

13. Определение удельных показателей генератора.

Главными или основными размерами ВАГ являются диаметр расточки D_i и длина l_i сердечника статора, которые должны обеспечить в целом такой вид токоскоростной характеристики (ТСХ), который соответствовал бы варианту задания на проект при приемлемой точности расчёта.

Токоскоростная характеристика соответствует номинальному напряжению на нагрузке и предельно допустимому току нагрузки при данной частоте вращения вала. Таким образом, она является кривой максимально возможной мощности генератора при любом эксплуатационном режиме.

Для расчёта D_i и l_i выбирают несколько характерных точек заданной ТСХ, составляют для каждой из них уравнения, связывающие основные размеры с геометрическими параметрами и электромагнитными загрузками машины, и решают полученную таким образом систему уравнений относительно D_i и l_i. Вычисленные размеры соответствуют каждой из выбранных точек и в целом всей ТСХ.

В качестве расчётных точек выбирают режимы:

– начала токоотдачи, соответствующий холостому ходу генератора при минимальной частоте вращения n_0 (точка 1);

– расчётный рабочий ($I_{d.P}$; n_P), соответствующий максимальному электромагнитному моменту генератора (точка 2);

– максимального тока нагрузки $I_{d.m}$, соответствующий максимальной частоте вращения n_m (точка 3).Максимальную частоту вращения вала генератора принимают равной 5000-8000 мин$^{-1}$.

При расчете главных размеров приходится учитывать большое количество часто противоречивых факторов, выбирая их наиболее благоприятные количественные соотношения. В качестве критерия оптимальности выбора принимают активный объём машины, который должен быть минимальным при условии выполнения всех технико-эксплуатационных характеристик.

2.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Номинальное выпрямленное напряжение на нагрузке U_d, В.
2. Начальная частота вращения n_o, мин$^{-1}$.
3. Частота вращения в расчётном режиме n_p, мин$^{-1}$.
4. Максимальная частота вращения n_m, мин$^{-1}$.
5. Максимальный ток нагрузки I_{dm}, А.
6. Ток нагрузки в расчётном режиме I_{dp}, А.

Величины, указанные выше, оговариваются в техническом задании или их определяют по заданной ТСХ (рис. 2.1).

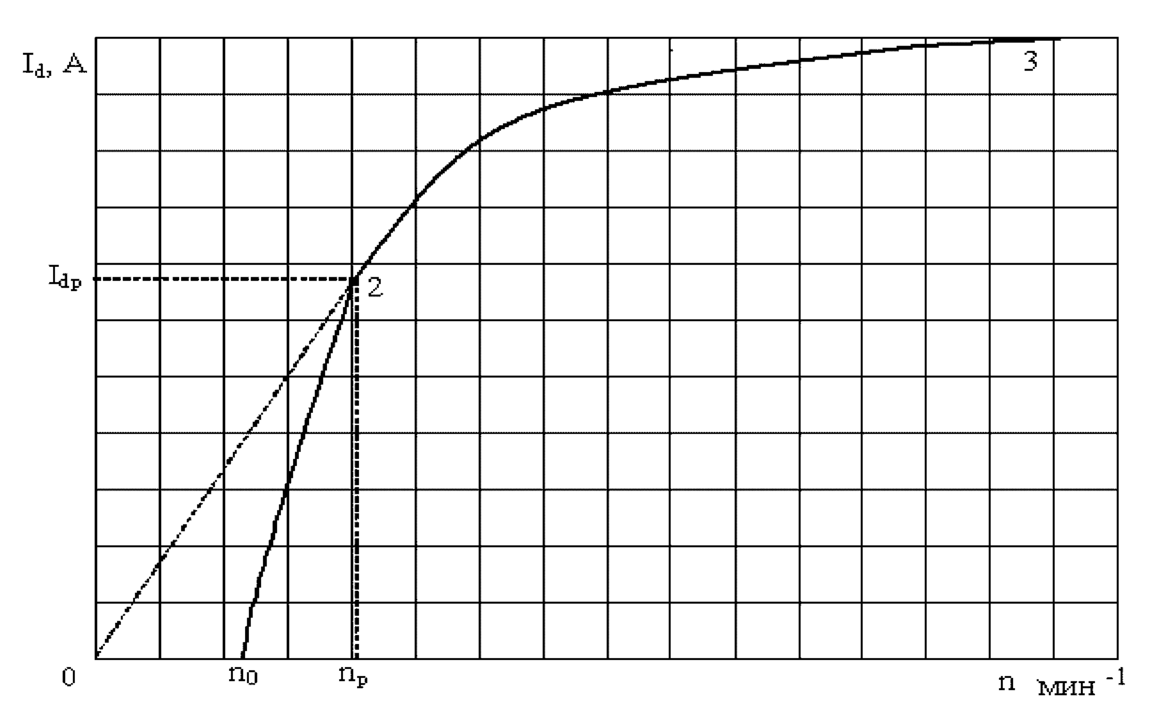


Рис. 2.1. Заданная токоскоростная характеристика

За начальную частоту вращения n_o принимают точку пересечения ТСХ с осью абсцисс (точка 1). Ток и частоту вращения в расчетном

режиме определяют как точку касания прямой, проведённой из начала координат, с ТСХ (точка 2). Максимальный ток нагрузки определяют при максимальной частоте вращения.

7. Расчетная выпрямленная мощность, Вт:

$$P_{d.P} = U_d I_{d.P}. \tag{2.1}$$

8. Максимальная выпрямленная мощность, Вт:

$$P_{d.m} = U_d I_{d.m}. \tag{2.2}$$

9. Число фаз генератора m в большинстве автомобильных генераторов принимается равным трём, что соответствует максимальному использованию активных материалов. В генераторах мощностью выше 2,5 кВт иногда по технологическим соображениям принимают m равным 5 или 7.

10. Соединение фаз генератора применяют по схеме «звезда» для генераторов нижнего диапазона мощностей и по схеме «треугольник» – для более мощных генераторов. Иногда в технически обоснованных случаях используют комбинированную обмотку, часть которой соединяют в звезду, а часть – в треугольник.

11. Для преобразования переменного фазного тока синхронного генератора в постоянный ток нагрузки применяют полупроводниковые выпрямители. В автомобильных генераторах, как правило, используют мостовые схемы выпрямления. В зависимости от величины тока нагрузки применяют одну или несколько мостовых схем, включенных последовательно или параллельно. Параметры наиболее употребительных вентилей для таких схем и технические характеристики существующих выпрямительных блоков для автомобильных генераторов даны в табл. П20.

12. Напряжение фазы генератора при различных токах нагрузки определяют по экспериментальным кривым в зависимости от мощности генератора (рис. 2.2, 2.3). Для определения фазного напряжения на холостом ходу $U_{ф0}$ пользуются формулой $U_{ф0} = K_U U_d, В$, где K_U – коэффициент выпрямления по напряжению, равный 0,42…0,45 при соединении фаз по схеме «звезда» и 0,73…0,75 при соединении фаз по схеме «треугольник».

13. Максимальный ток возбуждения генератора $I_{вт}$ зависит от способа регулирования выходного напряжения, типа регулятора возбуждения, условий эксплуатации, параметров и температуры нагрева обмотки возбуждения. Для интегральных регуляторов напряжения типа Я112, Я120 максимально допустимые токи возбуждения даны в табл. П18.

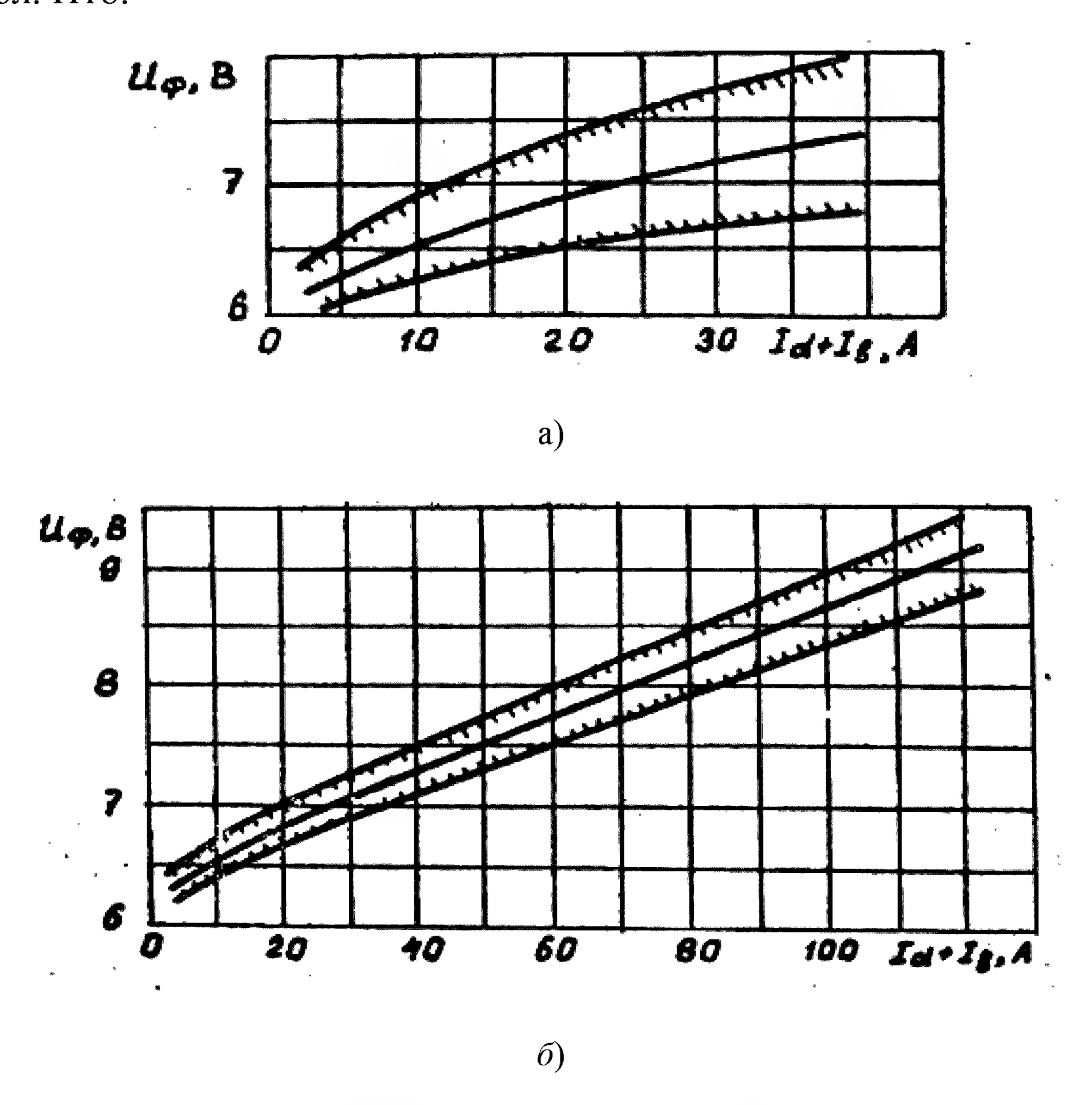


Рис. 2.2. Зависимости $U_Ф = \varphi(I_d + I_B)$ при $U_d = 14\ B$:

а) $P_d \le 700\ Вт$; *б)* $P_d > 700\ Вт$.

Верхняя граница области соответствует $\Delta U_B = 0{,}8...0{,}9\ B$, нижняя – $\Delta U_B = 0{,}3...0{,}4\ B$.

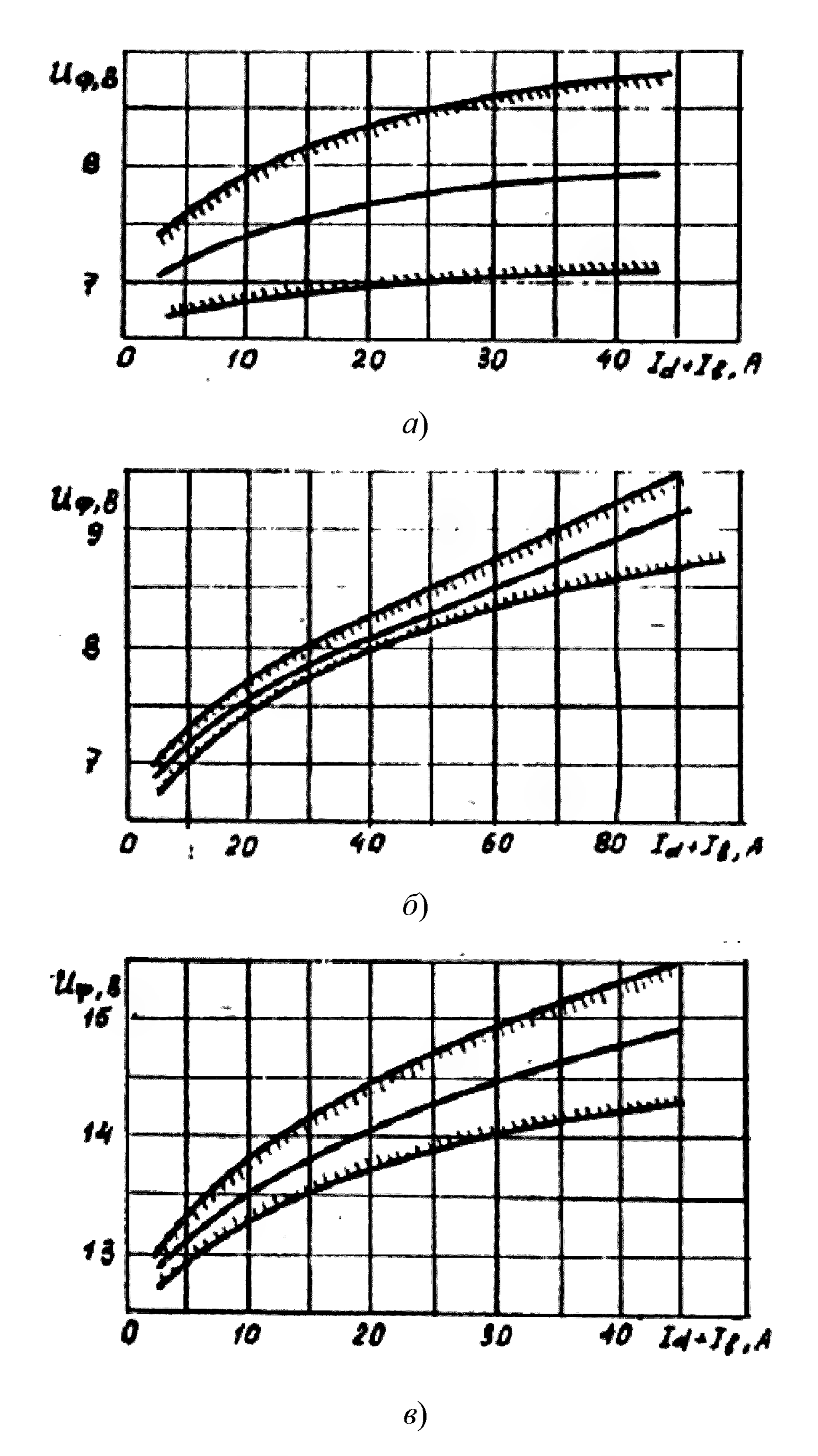


Рис. 2.3. Зависимости $U_Ф = \varphi(I_d + I_В)$ при $U_d = 14\ В$:

а) $P_d < 700\ Вт$; б) $P_d \ge 700\ Вт$; при $U_d = 28\ В$: в) $P_d \le 1000\ Вт$.

Верхняя граница области соответствует $\Delta U_В = 0{,}8...0{,}9\ В$, нижняя – $\Delta U_В = 0{,}3...0{,}4\ В$.

14. Коэффициент, учитывающий долю тока возбуждения от полного тока генератора в расчетном режиме:

$$K_{IB} = 1 + \frac{I_{в.т}}{I_{dp}}. \qquad (2.3)$$

15. Полный выпрямленный ток генератора в расчетном режиме:

$$I_{Г.Р} = K_{IB} I_{dp}, \quad \text{А} \qquad (2.4)$$

16. Фазный ток генератора, А:

в расчетном режиме $I_{Ф.Р} = K_I I_{ГР}$; (2.5)

в режиме максимальной нагрузки $I_{Ф.т} = K_I I_{d.m} K_{IB}$, (2.6)

где K_I – коэффициент выпрямления по току, равный при соединении фаз по схеме «звезда» 0,74…0,79 и 0,42…0,45 при соединении фаз по схеме «треугольник».

Коэффициент K_I также можно определить по опытной кривой (рис. 2.4) как функцию:

$$K_I = f(I_d / 3I_{НД}), \qquad (2.7)$$

где $I_{НД}$ – номинальный прямой ток одного диода схемы выпрямления.

17. Коэффициент выпрямления схемы по мощности

$$\eta_B = \frac{U_d I_{Г.Р}}{m U_{Ф.Р} I_{Ф.Р}}. \qquad (2.8)$$

Коэффициент η_B можно определить по опытной кривой рис. 2.5.

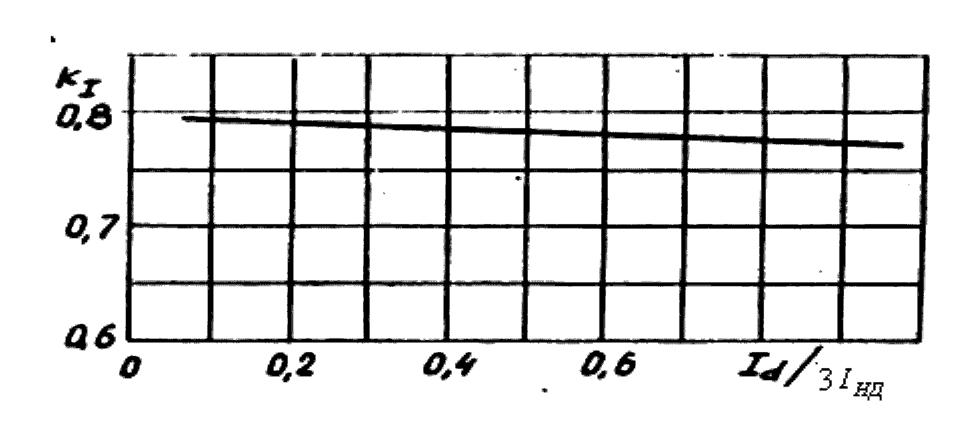


Рис. 2.4. Зависимость $K_I = f(\frac{I_d}{3I_{НД}})$.

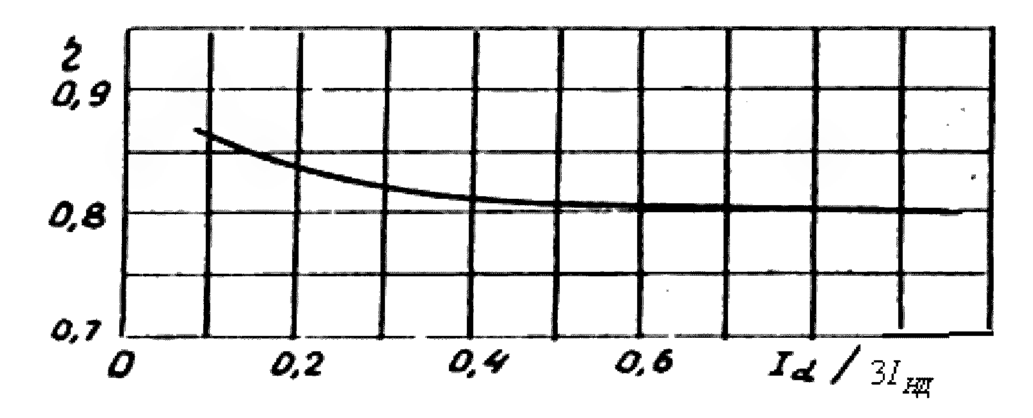


Рис. 2.5. Зависимость $\eta_B = f(\frac{I_d}{3I_{НД}})$.

2.2. РАСЧЕТ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ ГЕНЕРАТОРА

1. Уравнения связи главных размеров с параметрами и электромагнитными нагрузками генератора.

Режим начала токоотдачи (холостой ход, $n = n_0$)

$$D_i l_i = \frac{9{,}56 U_{Ф0}}{d_i K_Ф K_0 n_0 W_Ф B_{\delta 0}} \text{ м}^2. \tag{2.9}$$

Режим максимального момента ($I_{d.P}, n_P$)

$$D^2{}_i l_i = \frac{6{,}1 \cdot K_{IB} \cdot K_{UB} \cdot P_{d.P}}{K_Ф \cdot K_0 \cdot d_i \cdot B_{\delta 0} \cdot A_P \cdot n_0 \cdot \eta_B}, \text{ м}^2 \tag{2.10}$$

2. Ток фазы генератора $I_{Ф.m}$ при максимальном токе нагрузки примерно равен фазному току короткого замыкания $I_{Ф.К}$, А:

$$I_{Ф.m} \approx I_{Ф.К} = \frac{E_o}{X_d}, \tag{2.11}$$

где

$$X_d = \frac{U_{Ф0} \cdot n_m}{n_0 \cdot I_{Ф.m}} = \frac{n_m \cdot \mu_0 \cdot l_i \cdot W_Ф^2}{30} \left[\frac{2\pi \cdot \Sigma\lambda}{q} + \frac{m D_i K_0^2 K_d}{\delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu \cdot p} \right], \text{ Ом}. \tag{2.12}$$

3. Диаметр расточки статора генератора D_i в функции числа витков фазы $W_Ф$ находят, решая совместно два уравнения (2.9, 2.10):

$$D_i = \frac{0{,}64 K_I \cdot K_{UB} \cdot P_{d.P}}{\eta_B \cdot A_P \cdot U_{Ф0}} W_Ф = C_1 \cdot W_Ф, \text{ м} \tag{2.13}$$

где

$$C_1 = \frac{0{,}64 K_I \cdot K_{UB} \cdot P_{d.P}}{\eta_B \cdot A_P \cdot U_{\Phi 0}}, \text{ А.} \tag{2.14}$$

4. Длина пакета статора как функция W_Φ:

$$l_i = \frac{15 U_{\Phi 0}^2 \cdot A_P \cdot \eta_B}{\alpha_i \cdot K_\Phi \cdot K_0 \cdot K_{IB} \cdot K_{UB} \cdot n_0 \cdot B_{\delta 0} \cdot P_{d.P}} \cdot \frac{1}{W_\Phi^2} = \frac{C_2}{W_\Phi^2}, \text{ м} \tag{2.15}$$

где

$$C_2 = \frac{15 U_{\Phi 0}^2 \cdot A_P \cdot \eta_B}{\alpha_i \cdot K_\Phi \cdot K_0 \cdot K_{IB} \cdot K_{UB} \cdot n_0 \cdot B_{\delta 0} \cdot P_{d.P}}, \text{ А.} \tag{2.16}$$

5. Число последовательных витков в фазе:

$$W_\Phi = \frac{X_d - C_2 C_3}{C_1 \cdot C_2 \cdot C_4}, \tag{2.17}$$

где

$$C_3 = \frac{n_m \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot \sum \lambda}{15 q}, \tag{2.18}$$

$$C_4 = \frac{n_m \cdot \mu_0 \cdot K_0^2 \cdot m \cdot K_d}{30 K_\delta \cdot \delta \cdot K_\mu \cdot p}, \text{ А} \tag{2.19}$$

6. Рекомендуемые числовые значения параметров:

A_P – линейная нагрузка в расчетном режиме.

$A_P = 25000...60000\ А/м$, большие значения относятся к более мощным генераторам;

α_i – расчетный коэффициент полюсного перекрытия ($\alpha_i = 0{,}68...0{,}75$), большие значения относятся к более мощным генераторам;

K_Φ – коэффициент формы поля возбуждения ($K_\Phi = 1{,}015...1{,}11$; для синусоидальной формы поля возбуждения $K_\Phi = 1{,}11$);

q – число пазов на полюс и фазу (в автомобильных генераторах используют обмотки с $q = 0{,}5; 1; 2$);

$K_{UB} = \frac{U_{\Phi 0}}{U_{\Phi.P}}$ – коэффициент, характеризующий уменьшение фазного напряжения при холостом ходе по сравнению с фазным напряжением

при расчетной нагрузке (предварительно можно выбрать $K_{UB} = 0{,}9$ или вычислить как отношение напряжений, определенных при соответствующих токах нагрузки, рис. 2.3);

K_0 – обмоточный коэффициент по первой гармонике ($K_0 = 0{,}866$ при $q = 0{,}5$; $K_0 = 1$ при $q = 1$; $K_0 = 0{,}966$ при $q = 2$ для $m = 3$);

$B_{\delta 0}$ – индукция в воздушном зазоре на холостом ходу при начальной частоте вращения n_0 ($B_{\delta 0} = 0{,}4...1{,}2$ $Тл$);

$U_{Ф0}$ – фазное напряжение на холостом ходу, В;

μ_0 – магнитная проницаемость воздуха ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ $Гн/м$);

$\Sigma\lambda$ – суммарный коэффициент магнитной проводимости рассеяния фазы обмотки статора (при открытых пазах $\Sigma\lambda = 0{,}7...0{,}9$; при полузакрытых $\Sigma\lambda = 1...3{,}5$ при $q = 1$ $\Sigma\lambda = 3...4$);

K_d – коэффициент продольной реакции якоря ($K_d = 0{,}92...0{,}96$);

δ – рабочий воздушный зазор ($\delta = 3 \cdot 10^{-4}...5{,}5 \cdot 10^{-4}$ $м$, большие значения относятся к более мощным генераторам);

K_δ – коэффициент воздушного зазора ($K_\delta = 1{,}5...1{,}75$ для статоров с открытыми пазами и $q = 0{,}5$; $K_\delta = 1{,}1...1{,}3$ для статоров с полузакрытыми пазами и $q = 1$);

K_μ–коэффициент насыщения магнитной цепи генератора ($K_\mu = 1{,}6...1{,}8$);

p – число пар полюсов ($p = 6$);

$E_Ф$ – фазная ЭДС при максимальной частоте вращения ротора, В;

X_d – синхронное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси, Ом.

2.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ ГЕНЕРАТОРА

1. Заданные выходные характеристики:
выпрямленное напряжение $U_d = 14$ $В$;
начальная частота вращения: $n_0 = 600$ $об/мин$;
частота вращения в расчетном режиме: $n_р = 1100$ $об/мин$;

максимальная частота вращения: $n_m = 5000\ об/мин$;
расчетный ток нагрузки: $I_{d.P} = 70\ A$;
максимальный ток нагрузки: $I_{d.m} = 85\ A$.

2. Пользуясь рекомендованными пределами, предварительно выбираем следующие значения исходных параметров:

число фаз генератора $m = 3$;
соединение фаз – «звезда»;
коэффициент преобразования схемы по напряжению $K_U = 0{,}45$;
коэффициент преобразования схемы выпрямления по току $K_I = 0{,}74$;
расчётный коэффициент полюсного перекрытия $\alpha_i = 0{,}67$;
коэффициент формы поля возбуждения $K_Ф = 1{,}11$;
число пазов на полюс и фазу $q = 0{,}5$;
число пар полюсов $p = 6$;
форма паза статора – открытый;
коэффициент рассеяния магнитного потока втулки ротора $\sigma_{BT} = 1{,}47$;
коэффициент рассеяния магнитного потока полюса индуктора $\sigma_{КЛ} = 1{,}35$;
коэффициент заполнения обмотки возбуждения $K_{з2} = 0{,}5$;
суммарный коэффициент магнитной проводимости рассеяния статора $\Sigma\lambda = 0{,}5$;
коэффициент реакции якоря по продольной оси $K_d = 0{,}93$;
коэффициент воздушного зазора $K_\delta = 1{,}6$;
коэффициент насыщения магнитной цепи $K_\mu = 1{,}7$;
величина рабочего воздушного зазора $\delta = 0{,}0005\ м$;
обмоточный коэффициент $K_0 = 0{,}866$.

3. Мощность нагрузки:

расчетная $P_d = U_d \cdot I_{d.P} = 14 \cdot 70 = 980\ Вт$;
максимальная $P_{d.m} = U_d \cdot I_{d.m} = 14 \cdot 85 = 1190\ Вт$.

4. Фазное напряжение генератора:

на холостом ходу $U_Ф = K_U \cdot U_d = 0{,}45 \cdot 14 = 6{,}3\ B$;
при расчетном токе нагрузки (по рис. 2.2) $U_{Ф.P} = 7\ B$;
при максимальном токе нагрузки (по рис. 2.2) $U_{Ф.m} = 7{,}1\ B$.

5. Коэффициент, характеризующий относительную величину тока возбуждения генератора:

$$K_{IB} = 1 + \frac{I_{B.m}}{I_{d.P}} = 1 + \frac{3,3}{70} = 1,047 \qquad (2.20)$$

Максимально допустимый ток возбуждения $I_{B.m} = 3,3\ A$ (табл. П18).

6. Коэффициент, характеризующий уменьшение фазного напряжения при холостом ходе по сравнению с фазным напряжением при расчетном токе нагрузки:

$$K_{UB} = \frac{U_{\Phi 0}}{U_{\Phi.P}} = \frac{6,3}{7} = 0,9 \qquad (2.21)$$

7. Полный выпрямленный ток генератора:

при расчетном токе нагрузки: $I_{Г.P} = K_{IB} I_{d.P} = 1,047 \cdot 70 = 73,29\ A$;

при максимальном токе нагрузки: $I_{Г.m} = K_{IB} I_{d.m} = 1,047 \cdot 85 = 89\ A$.

8. Фазный ток генератора:

при расчетном токе нагрузки $I_{\Phi.P} = K_I I_{Г.P} = 0,74 \cdot 73,29 = 54,23\ A$;

при максимальном токе нагрузки $I_{\Phi.m} = K_I I_{Г.m} = 0,74 \cdot 89 = 65,86\ A$.

9. Коэффициент выпрямления схемы:

$$\eta_B = \frac{U_d I_{Г.P}}{m U_{\Phi.P} I_{\Phi.P}} = \frac{14 \cdot 73,29}{3 \cdot 7 \cdot 67,2} = 0,727 \qquad (2.22)$$

10. Для расчета принимают несколько значений индукции в воздушном зазоре при холостом ходе генератора в пределах $B_{\delta 0} = 0,5...1,2\ Тл$.

11. Для расчета принимают несколько значений линейной нагрузки в диапазоне $A_P = 20000...60000\ A/м$.

12. Синхронное индуктивное сопротивление машины по продольной оси:

$$X_d = \frac{U_{\Phi 0} \cdot n_m}{K_I \cdot K_{IB} \cdot n_0 \cdot I_{d.m}} = \frac{6,3 \cdot 5000}{0,74 \cdot 1,047 \cdot 85 \cdot 600} = 0,797\ Ом. \qquad (2.23)$$

13. Коэффициент C_1 определяется как функция линейной нагрузки:

$$C_1 = \frac{0,64 K_I \cdot K_{UB} \cdot P_{d.P}}{\eta_B \cdot A_P \cdot U_{\Phi 0}} = \frac{0,64 \cdot 0,74 \cdot 0,9 \cdot 980}{0,727 \cdot 6,3 \cdot A_P} = \frac{129}{A_P}. \qquad (2.24)$$

Расчетные значения C_1 для различных величин A_P представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Расчетные значения C_1

A_P, $A/м$	20000	30000	40000	50000	60000
C_1	$6{,}45 \cdot 10^{-3}$	$4{,}3 \cdot 10^{-3}$	$3{,}22 \cdot 10^{-3}$	$2{,}58 \cdot 10^{-3}$	$2{,}15 \cdot 10^{-3}$

14. Коэффициент C_2 определяется как функция переменных A_P и $B_{\delta 0}$:

$$C_2 = \frac{15 U_{\Phi 0}^2 \cdot \eta_B \cdot A_P}{\alpha_i \cdot K_\Phi \cdot K_0 \cdot K_{IB} \cdot K_{UB} \cdot n_0 \cdot P_{d.P} \cdot B_{\delta 0}} = \frac{15 \cdot 6{,}3^2 \cdot 0{,}9 \cdot A_P}{0{,}7 \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}866 \cdot 1{,}047 \cdot 0{,}9 \cdot 600 \cdot 980 \cdot B_{\delta 0}} = \frac{1{,}44 \cdot 10^{\ 3} \cdot A_P}{B_{\delta 0}}. \quad (2.25)$$

Расчетные значения C_2 при различных величинах A_P и $B_{\delta 0}$ представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Расчетные значения C_2

Индукция	Линейная нагрузка A_P, $A/м$				
$B_{\delta 0}$, $Тл$	20000	30000	40000	50000	60000
0,6	47,9	71,86	95,81	119,76	143,72
0,8	35,93	53,89	71,86	89,82	107,79
1,0	23,95	35,92	47,9	59,88	71,86
1,2	28,74	43,11	57,49	71,86	86,23

15. Коэффициент C_3:

$$C_3 = \frac{n_m \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot \sum \lambda}{15q} = \frac{5000 \cdot 4 \cdot 3{,}14^3 \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}5}{15 \cdot 0{,}5} = 1{,}316 \cdot 10^{-3}. \quad (2.26)$$

16. Коэффициент C_4:

$$C_4 = \frac{n_m \cdot \mu_0 \cdot K_0^2 \cdot m \cdot K_d}{30 K_\delta \cdot \delta \cdot K_\mu \cdot p} = \frac{5000 \cdot 4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}866^2 \cdot 3 \cdot 0{,}93}{30 \cdot 1{,}6 \cdot 0{,}0005 \cdot 1{,}7 \cdot 6} = 5{,}37 \cdot 10^{-4}. \quad (2.27)$$

17. Число последовательных витков фазы генератора определяют при различных значениях A_P и $B_{\delta 0}$. Соответствующие значения коэффициентов C_1 и C_2 берут из табл. 2.1 и табл. 2.2.

$$W_\Phi = \frac{X_d - C_2 C_3}{C_1 \cdot C_2 \cdot C_4} = \frac{0{,}797 - 1{,}316 \cdot 10^{\ 3} \cdot C_2}{5{,}37 \cdot 10^{\ 4} \cdot C_1 \cdot C_2} \quad (2.28)$$

Результаты расчета $W_Ф$ представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Число витков в фазе $W_Ф$ при различных значениях A_P и $B_{\delta 0}$.

Индукция	Линейная нагрузка A_P, $А/м$				
$B_{\delta 0}$, $Тл$	20000	30000	40000	50000	60000
0,6	41,24	42,33	40,5	38,53	36,6
0,8	30,24	56,34	56,53	54,55	52,64
1,0	76,26	73,36	72,56	70,55	68,66
1,2	92,28	90,39	88,61	86,57	84,66

18. Результаты расчета конструктивных показателей генератора при различных значениях A_P и $B_{\delta 0}$ представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Конструктивные показатели

Линейная нагрузка A_P, $А/м$	Индукция $B_{\delta 0}$, $Тл$	Конструктивные показатели			
		Диаметр расточки D_i, $м$	Длина пакета l_i, $м$	Коэффициент λ	Объем активных материалов $V_\Sigma \cdot 10^{3}$, $м^3$
20000	0,6	0,284	0,0247	0,085	19,9
	0,8	0,387	0,0099	0,0558	14,8
	1,0	0,49	0,00497	0,0101	11,9
	1,2	0,593	0,00283	0,00477	9,95
30000	0,6	0,181	0,0407	0,224	13,3
	0,8	0,249	0,016	0,0642	9,92
	1,0	0,318	0,00787	0,0247	7,96
	1,2	0,387	0,00443	0,0114	6,63
40000	0,6	0,129	0,0599	0,464	9,96
	0,8	0,18	0,0229	0,127	7,42
	1,0	0,232	0,011	0,0474	5,93
	1,2	0,283	0,00618	0,0218	4,95
50000	0,6	0,098	0,0829	0,845	7,96
	0,8	0,139	0,0308	0,221	5,95
	1,0	0,18	0,0147	0,0817	4,76
	1,2	0,222	0,00809	0,0364	3,99
60000	0,6	0,077	0,111	1,441	6,58
	0,8	0,112	0,0398	0,355	4,99
	1,0	0,146	0,0186	0,127	3,96
	1,2	0,181	0,01	0,0552	3,27

19. Определяющим критерием выбора рабочих вариантов является соответствие величины конструктивного коэффициента $\lambda_i = {}^{l_i}\!/_{D_i}$ рекомендуемым значениям ($\lambda_i = 0{,}3 \ldots 0{,}55$). При $B_{\delta 0} = 0{,}6\ Тл$ этому критерию соответствует количество витков в фазе, равное 42 и 40, при $B_{\delta 0} = 0{,}8\ Тл$ – 54 и 52. При других значениях $B_{\delta 0}$ величины коэффициентов λ_i выходят за рамки рекомендованных.

Из условия выполнимости обмотки необходимо, чтобы число проводников в пазу, равное ${}^{2mW_Ф}\!/_{Z}$, было целым и чётным. При индукции $B_{\delta 0} = 0{,}6\ Тл$ этому условию соответствует число витков в фазе, равное 42, при $B_{\delta 0} = 0{,}8\ Тл$ число витков в фазе, равное 54.

Таким образом, возможно два варианта обмотки, из которых предпочтительнее является второй, так как он соответствует меньшему активному объёму машины. Поэтому в качестве рабочего варианта выбираем генератор, имеющий следующие конструктивные показатели:

– диаметр расточки $D_i = 0{,}139\ м$;

– длина пакета статора $l_i = 0{,}0308\ м$;

– число витков в фазе $W_Ф = 54$;

– индукция в зазоре $B_{\delta 0} = 0{,}8\ Тл$.

Для грузовых автомобилей и автобусов максимальный наружный диаметр генераторов переменного тока мощностью до 1200 Вт не должен превышать 0,19 м. С учётом толщины крышек наружный диаметр пакета статора генератора составит примерно 0,18 м.

По опыту выпускаемых зарубежных и отечественных генераторов переменного тока с клювообразным индуктором отношение наружного диаметра D_H к диаметру расточки статора D_i равно 1,33…1,43, откуда $D_i = (1{,}26 \ldots 1{,}35) \cdot 10^{2}\ м$. Расчётный диаметр соответствует указанным рекомендациям. Вместе с тем он незначительно отличается от диаметра расточки наиболее распространенного автобусного генератора, у которого $D_i = 0{,}133\ м$. Типы обмоток и конфигурация зубцовой зоны у обоих генераторов одинаковы.

В целях унификации размеров статорного железа и снижения затрат на проектирование и изготовление технологической оснастки целесообразно отступить от расчётной величины D_i и принять для рабочего варианта генератора диаметр расточки $D_i = 0{,}133\ м$. Выбор унифицированного диаметра облегчает вопрос компоновки генератора на двигателе внутреннего сгорания.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие основные виды расчетов входят в расчетную часть проекта вентильного генератора?

2. Какова структура технического задания на проект вентильных генераторов автотракторного назначения, выполненных с контактными кольцами и клювообразным ротором?

3. Как рассчитать фазные напряжение и ток автомобильного вентильного генератора по заданным для расчетного режима в техническом задании средним значениям выпрямленного напряжения и тока?

4. Какие размеры автомобильного вентильного генератора принято считать главными (основными)?

5. Какие величины называются электромагнитными нагрузками и каковы физические ограничения, накладываемые при их выборе на этапе определения главных размеров?

6. За счет чего можно уменьшить главные размеры автомобильного вентильного генератора?

7. Почему автомобильные вентильные генераторы проектируются с шестью парами полюсов, а не с большим или меньшим их числом?

8. Чем определяется число витков в фазе обмотки статора?

9. Как графически выглядит кривая токоскоростной характеристики автомобильного вентильного генератора?

10. Каким по величине и почему должен выбираться воздушный зазор между статором и ротором вентильных генераторов автотракторного назначения, выполненных с контактными кольцами и клювообразным ротором?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии освещены вопросы конструкции и принципа работы вентильных автомобильных генераторов.

Подробно изложена методика расчета и выбора основных размеров, расчета магнитной цепи, обмоток статора и возбуждения. Приводится пример расчета главных размеров вентильного автомобильного генератора. Пример расчета позволяет более подробно разобраться в изложенных методиках проектирования и расчета.

В приложении даны все сведения по конструкционным, магнитным и проводниковым материалам, необходимые для выполнения расчета вентильного автомобильного генератора.

Для более подробного изучения конструкции и принципа работы вентильных автомобильных генераторов рекомендуется обратиться к источникам, приведенным в библиографическом списке [1, 2, 7, 9] .

В первой части учебного пособия не рассматривались вопросы расчета характеристик и оптимизации вентильных автомобильных генераторов, базирующиеся на точных методиках расчета магнитных полей по специальным программам на ПК. Эти вопросы будут рассмотрены во второй части учебного пособия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акимов, А.В. Генераторы зарубежных автомобилей / А.В. Акимов, С.В. Акимов, Л.П. Лейкин. – М.: За рулем, 1998. – 80 с.: ил. – ISBN 5-85907-093-4.

2. Акимов, С.В. Электрооборудование автомобилей: учебник для ВУЗов / С.В. Акимов, Ю.П. Чижков. – М.: За рулем. – 2004. – 384 с. – ISBN 5-85907-274-0(3).

3. Балагуров, В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учебное пособие / В.А. Балагуров. – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.

4. Балагуров, В.А. Проектирование генераторов переменного тока с когтеобразными полюсами: учебное пособие / В.А. Балагуров. – М.: МЭИ, 1980. – 75 с.

5. Власов, В.М. Перспективы применения напряжения 42В на борту автомобиля / В.М. Власов, В.Е. Ютт, С.А. Феофанов // Электроснабжение и электрооборудование. – 2007. – № 1. – С.10-11.

6. ГОСТ Р 52230-2004 «Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия». (Дата введения 2005-01-01).

7. Набоких, В.А. Основные направления развития конструкции электрооборудования и автоэлектроники на современном этапе / В.А. Набоких // Автотракторное электрооборудование. – 2007. – № 1-2. – С. 8-10.

8. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков; под. ред. И.П.Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 258 с.

9. Фесенко, М.Н. Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования: учебник / М.Н. Фесенко [и др.]; под. ред. М.Н. Фесенко. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1992. – 384 с. – ISBN 5-217-01384-2.

10. Ютт, В.Е. Тенденции развития бортовой сети автомобилей за рубежом / В.Е. Ютт, С.А. Феофанов // Сб. науч. тр. II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Ч. 2. – Тольятти: ТГУ, 2007. – С. 151-154.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Основные параметры стартерных аккумуляторных батарей по ГОСТ 959.0-84Е

Тип батареи	Минимальная емкость при 25 °С на четвертом цикле, С20 АЧ	Сила разрядного тока в стартерном режиме $I_{Кст}$, А	Габариты, a×b× h, мм	Масса с электролитом, кг
6СТ-55ЭМ	55	255	262×174×266	21,5
6СТ-55А3	55	255	242×175×210	16,5
6СТ-60ЭМ	51	180	283×182×237	24,5
6СТ-66А	60	-	301×175×210	19
6СТ-75ТМ	71	225	358×177×240	30
6СТ-90ЭМ	85,5	270	421×186×240	36
6СТ-105ЭМ	100	315	476×187×240	39,1
6СТ-132ЭМ	125	396	514×211×244	49,5
6СТ-182ЭМ	173	546	522×282×243	69,5
6СТ-190ТМ	Не регламентируется	570	582×237×236	70
6СТ-190ТР		570	582×237×236	70

Таблица П2

Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ, ПЭТ-155 и ПЭТ-200

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2
0,08	0,1	0,00502
0,09	0,11	0,00636
0,1	0,122	0,00785
0,112	0,134	0,00985
0,125	0,147	0,01227
(0,132)	0,154	0,01368
0,14	0,162	0,01539
0,15	0,18	0,01767
0,16	0,19	0,0201
0,17	0,2	0,0227
0,18	0,21	0,0255
(0,19)	0,22	0,0284
0,2	0,23	0,0314
(0,212)	0,242	0,0353
0,224	0,259	0,0394
(0,236)	0,271	0,0437
0,25	0,285	0,0491
(0,265)	0,3	0,0552
0,28	0,315	0,0616
(0,3)	0,335	0,0707
0,315	0,35	0,0779
0,335	0,37	0,0881
0,355	0,395	0,099
0,375	0,415	0,1104
0,4	0,44	0,1257
0,425	0,565	0,1419
0,45	0,49	0,159
(0,475)	0,515	0,1772
0,5	0,545	0,1963
(0,53)	0,585	0,221
0,56	0,615	0,246
0,6	0,655	0,283
0,63	0,69	0,312
(0,67)	0,73	0,353
0,71	0,77	0,396
0,75	0,815	0,442

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2
0,8	0,865	0,503
0,9	0,965	0,636
0,95	1,015	0,709
1	1,08	0,785
1,06	1,14	0,883
1,12	1,2	0,985
1,18	1,26	1,094
1,25	1,33	1,227
1,32	1,405	1,368
1,40	1,485	1,539
1,5	1,585	1,767
1,6	1,685	2,011
1,7	1,785	2,27
1,8	1,895	2,54
1,9	1,995	2,83
2	2,095	3,14
2,12	2,22	3,53
2,24	2,34	3,94
2,36	2,46	4,36
2,5	2,6	4,91

Таблица П3

Размеры и площадь поперечного сечения прямоугольной проволоки

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм																	
	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12
	Расчетное сечение проволоки, мм^2																	
2	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585	–	–	–	–	–	–	–
2,12	1,559	–	1,734	–	1,905	–	2,16	–	2,435	–	2,753	–	–	–	–	–	–	–
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,16	1,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369	–	–	–	–	–
2,36	1,751	–	1,95	–	2,145	–	2,429	–	2,735	–	3,089	–	3,561	–	–	–	–	–
2,5	1,863	1,97	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,91	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	–	–	–
2,65	1,983	–	2,211	–	2,435	–	2,753	–	3,098	–	3,495	–	4,025	–	4,407	–	–	–
2,8	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	–
3	2,263	–	2,526	–	2,785	–	3,145	–	3,535	–	3,985	–	4,585	–	5,038	–	5,638	–
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,51	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	2,543	–	2,841	–	3,135	–	3,537	–	3,973	–	4,475	–	5,145	–	5,667	–	6,337	–
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,11	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
3,75	2,863	–	3,201	–	3,535	–	3,985	–	4,473	–	5,035	–	5,785	–	6,387	–	7,137	–
4	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	3,263	–	3,551	–	4,035	–	4,545	–	5,098	–	5,735	–	6,585	–	7,287	–	8,137	–
4,5	3,463	3,67	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,41	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
4,75	3,663	–	4,101	–	4,535	–	5,105	–	5,723	–	6,435	–	7,385	–	8,188	–	9,137	–
5	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,3	4,103	–	4,596	–	5,085	–	5,721	–	6,41	–	7,205	–	8,265	–	9,177	–	10,24	–
5,6	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	8,101	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6	4,663	–	5,226	–	5,785	–	6,505	–	7,285	–	8,185	–	9,385	–	10,44	–	11,64	–
6,3	4,90	5,2	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,66	9,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
6,7	–	–	5,856	–	6,485	–	7,289	–	8,16	–	9,165	–	10,51	–	11,7	–	13,04	–
7,1	–	–	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,66	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,5	–	–	–	–	7,285	–	8,185	–	9,16	–	10,29	–	11,79	–	13,14	–	14,64	–
8	–	–	–	–	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,6
8,5	–	–	–	–	–	–	9,305	–	10,41	–	11,69	–	13,39	–	14,94	–	16,64	–
9	–	–	–	–	–	–	9,865	10,41	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,5	–	–	–	–	–	–	–	–	11,66	–	13,09	–	14,99	–	16,74	–	18,64	–
10	–	–	–	–	–	–	–	–	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	14,63	–	16,75	–	18,72	–	20,84	–
11,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	15,47	16,59	17,71	18,68	19,8	20,92	22,04	23,38

Продолжение табл. П3

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм																
	2,24	2,36	2,5	2,65	2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6
	Расчетное сечение проволоки, мм^2																
2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,24	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,36	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,65	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,15	6,693	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,35	7,141	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,55	7,589	7,829	8,326	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,75	8,037	–	8,826	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4	8,897	8,891	9,451	10,65	10,85	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,25	9,157	–	10,08	–	11,35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,5	9,717	10,07	10,7	11,38	12,05	12,95	13,63	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,75	10,28	–	11,33	–	12,75	–	14,41	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5	10,84	11,25	11,95	12,7	13,45	14,45	15,2	16,2	17,2	–	–	–	–	–	–	–	–
5,3	11,51	–	12,7	–	14,29	–	16,15	–	18,27	–	–	–	–	–	–	–	–
5,6	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54	–	–	–	–	–	–
6	13,08	–	14,45	–	16,25	–	18,35	–	20,75	–	23,14	–	–	–	–	–	–
6,3	13,75	14,32	15,2	16,15	17,09	18,35	19,3	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	–	–	–	–
6,7	14,65	–	16,2	–	18,21	–	20,56	–	23,24	–	25,94	–	29,29	–	–	–	–
7,1	15,54	16,21	17,2	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	–	–
7,5	16,44	–	18,2	–	20,45	–	23,08	–	26,08	–	29,14	–	32,89	–	36,64	–	–
8	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,5	18,68	–	20,7	–	23,25	–	26,23	–	29,63	–	33,14	–	37,39	–	41,64	–	46,74
9	19,8	20,69	21,95	23,3	24,65	26,54	27,8	29,6	31,4	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,5	20,92	–	23,2	–	26,05	–	29,38	–	33,18	–	37,14	–	41,89	–	46,64	–	52,34
10	22,04	23,05	25,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,6	23,38	–	25,95	–	29,13	–	32,84	–	37,08	–	41,54	–	46,84	–	52,14	–	58,5
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,79	49,54	52,34	55,14	58,5	61,86
11,8	26,07	–	28,95	–	32,49	–	36,62	–	41,24	–	46,34	–	52,24	–	52,14	–	65,22
12,5	27,64	24,95	30,7	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Окончание табл. П3

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм												
	5	5,1	5,3	5,5	5,6	6	6,5	7	8	9	10	11	12,5
	Расчетное сечение проволоки, мм^2												
10,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	96,34	–	–	–
11,2	55,14	–	58,50	–	61,86	–	–	–	–	–	–	–	–
11,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	103,64	–	–	–
11,8	58,14	–	–	–	65,22	–	–	–	–	–	–	–	–
12,5	61,64	–	65,39	–	69,14	–	–	–	99,14	111,64	124,14	136,66	155,41
13,2	65,14	–	–	–	73,06	–	–	–	–	–	–	–	–
13,5	–	–	–	–	–	–	–	93,64	107,14	120,64	–	–	–
14	69,14	–	73,34	–	77,54	–	–	–	–	–	–	–	–
14,5	–	–	–	–	–	–	93,39	100,64	115,14	129,64	–	–	–
15	74,14	–	–	–	83,14	–	–	–	–	–	–	–	–
15,6	–	–	–	–	–	–	100,54	108,34	123,94	139,54	154,14	–	–
16	79,14	–	83,94	–	88,74	95,14	–	–	127,14	–	–	–	–
16,8	–	84,82	–	91,54	–	99,94	108,34	116,74	133,54	–	–	–	–
18	–	90,94	–	98,14	–	107,14	116,14	125,14	143,14	–	–	–	–
19,5	–	98,59	–	106,39	–	116,14	125,89	135,64	155,14	–	–	–	–
20	99,14	–	–	–	–	119,14	–	–	159,14	–	–	–	–
22	–	111,34	–	120,14	–	131,14	142,14	153,14	–	–	–	–	–
25	124,14	126,64	–	136,64	–	149,14	161,64	174,14	–	–	–	–	–
26,3	–	133,27	–	143,79	–	158,94	170,09	183,24	–	–	–	–	–
28	–	141,94	–	153,14	–	167,14	181,14	195,14	–	–	–	–	–
30	149,14	152,14	–	164,14	–	–	–	–	–	–	–	–	–
32	–	162,34	–	175,14	–	–	–	–	–	–	–	–	–
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица П4

Кривая намагничивания листовой электротехнической стали марок 1211, 1212, 1311 (слабо- и среднелегированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/м									
0,4	140	143	146	149	152	153	158	161	164	167
0,5	171	175	179	183	187	191	195	199	203	207
0,6	211	216	221	226	231	236	241	246	251	256
0,7	261	266	271	276	281	287	293	299	306	312
0,8	318	324	330	337	344	352	360	369	378	387
0,9	397	407	417	427	437	447	458	469	480	491
1	502	514	527	541	555	570	585	600	615	631
1,1	647	664	682	701	720	739	859	779	800	821
1,2	843	866	891	918	946	976	1010	1040	1070	1100
1,3	1149	1180	1220	1260	1300	1340	1380	1430	1480	1530
1,4	1580	1640	1710	1780	1860	1950	2050	2150	2260	2380
1,5	2500	2640	2790	2950	3110	3280	3460	3660	3880	4120
1,6	4370	4630	4910	5220	5530	5880	6230	6600	6980	7370
1,7	7780	8200	8630	9070	9630	10100	10600	11 100	11 600	12200
1,8	12800	13400	14200	14600	15200	15900	16600	17300	18000	18800
1,9	19700	20600	21600	22600	23600	24600	25600	26800	28200	29600
2	31000	32500	34300	36500	39000	42000	45500	49500	54500	59500
2,1	65500	72500	80000	88000	96000	104000	112000	120000	128000	136000
2,2	144000	152000	160000	168000	176000	184000	192000	200000	208000	216000
2,3	224000	232000	240000	248000	256000	264000	272000	280000	288000	296000
2,4	304000	312000	320000	328000	336000	344000	352000	360000	368000	376000
2,5	384000	392000	400000	408000	416000	424000	432000	440000	448000	456000

Таблица П5

Основная кривая намагничивания (сталь 2013)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/м									
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1	ПО	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,3	620	670	780	890	1000	ИЗО	1240	1350	1460	1580
1,6	1700	1860	2020	2180	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1,7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1,8	7000	7500	8000	8500	9200	10000	10600	11 200	11 800	12400
1,9	13000	13600	14200	14 800	15600	16500	17300	18100	18900	19800
2	20700	22600	24400	26300	28100	30000	36000	42000	48000	54000
2,1	60000	67000	74000	81000	88000	95000	102000	109000	116000	123000
2.2	130000	138000	146000	154000	162000	170000	178000	186000	194000	202000
2,3	210000	218000	226000	234000	242000	250000	258000	266000	274000	282000
2,4	290000	298000	306000	314000	322000	330000	338000	346000	354000	362000

Таблица П6

Кривая намагничивания литой стали, толстые листы (Ст3), поковки

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
0,1	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152
0,2	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232
0,3	240	248	250	264	272	280	288	296	304	312
0,4	320	328	336	344	352	360	368	376	384	392
0,5	400	404	417	426	434	443	452	461	470	479
0,6	488	497	506	516	525	535	544	554	564	574
0,7	584	539	603	613	623	632	642	652	662	672
0,8	682	639	703	724	734	745	755	766	776	787
0,9	798	810	823	835	848	850	873	885	898	911
1	924	938	953	969	986	1004	1022	1039	1056	1073
1.1	1090	1108	1127	1147	1167	1187	1207	1227	1248	1269
1,2	1290	1315	1340	1370	1400	1430	1460	1490	1520	1555
1,3	1590	1630	1670	1720	1760	1810	1860	1920	1970	2030
1,4	2090	2160	2230	2300	2370	2440	2530	2620	2710	2800
1,5	2890	2990	3100	3210	3320	3430	3560	3700	3830	3960
1,6	4100	4250	4400	4550	470(1	4870	5000	5150	5300	5500

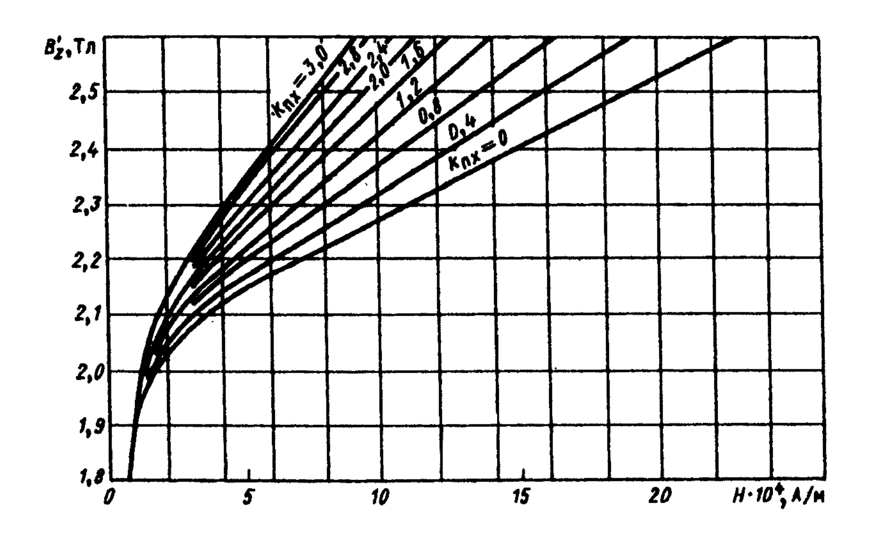


Рис. П1. Кривые намагничивания стали марки 2013
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока и синхронных)

Таблица П7

Основная кривая намагничивания (стали 2212, 2214 и 2312)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0.04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н А/м									
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
1	240	24«	252	258	264	270	276	282	288	294
1.1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1000	1060	1120	1180	1240	1300	1360	1420	1480	1540
1,5	1600	1750	1900	2050	2200	2350	2500	2700	2900	3100
1,6	3400	3600.	3800	4100	4400	4700	5300	5900	6500	7100
1,7	7700	8200	8900	9400	10000	10600	11 100	11 700	12200	12800
1,8	13400	14000	14600	15200	15800	16400	17000	17600	18200	18800
1,9	19400	20000	21800	23700	25700	27800	30000	32200	34400	36600
2	38800	41000	43200	45400	47600	49800	52000	54500	57500	60500
2.1	65500	72500	80000	88000	96000	104000	112000	120000	128000	136000
2,2	144000	152000	160000	168000	176000	184000	192000	200000	208000	216000
2,3	224000	232000	240000	248000	256000	264000	272000	280000	288000	296000
2,4	304000	312000	320000	328000	336000	344000	352000	360000	368000	376000

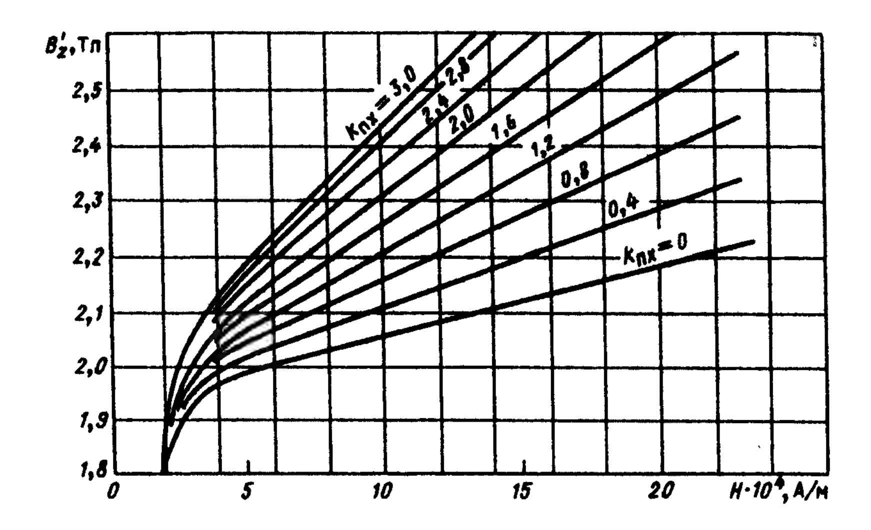


Рис. П2. Кривые намагничивания стали марок 2211, 2312, 2411
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока
и синхронных)

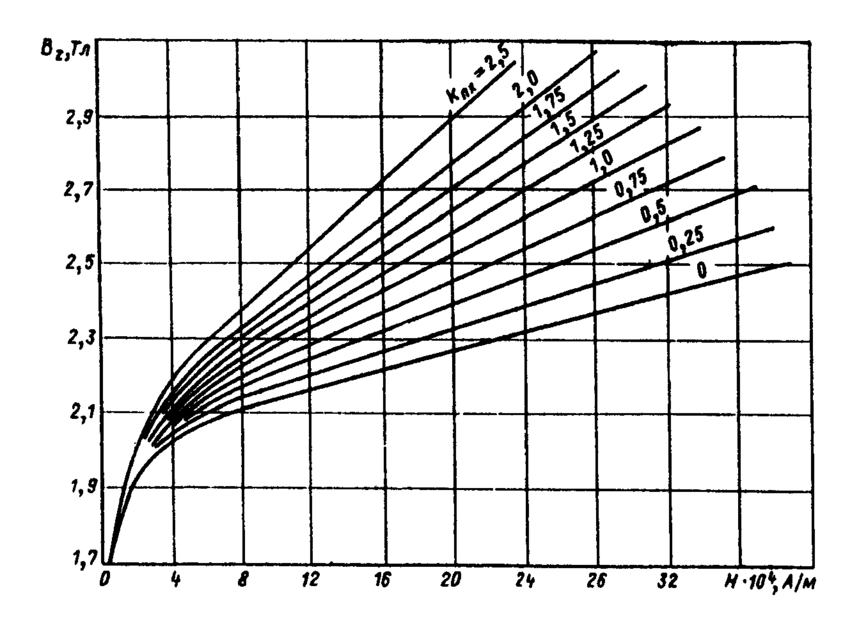


Рис. П3. Кривые намагничивания стали марок 1211, 1212, 1311
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока
и синхронных)

Таблица П8

Листовая электротехническая сталь
марок 1411, 1412, 1413 (повышенно-легированная)

В, Т л	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/м									
0,2	44	45	47	48	49	50	51	52	54	55
0,3	56	57	58	59	60	61	63	64	65	66
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0.9	166	170	174	179	184	189	194	199	205	211
1	217	223	230	237	241	252	260	269	278	288
1,1	298	309	320	332	345	359	374	390	407	425
1,2	444	465	487	510	535	562	590	620	652	686
1,3	722	760	800	850	900	960	1030	1110	1200	1300
1,4	1410	1530	1660	1810	1970	2140	2320	2510	2710	2920
1,5	3140	3370	3610	3870	4140	4420	4710	5010	5320	5640
1,6	5980	6330	6700	7090	7500	7930	8380	8850	9340	9860
1,7	10100	11000	11600	12300	13000	13700	14500	15300	16200	17100
1,8	18 100	19100	20200	21400	22700	24100	25600	27200	29000	31 100
1,9	33500	36300	39700	43700	48300	53700	59700	66200	73200	80600
2	88300	96100	104000	112000	120000	128000	136000	144000	151000	159000
2,1	167000	175000	183000	191000	199000	207000	215000	223000	231000	239000
2,2	246000	254000	262000	270000	278000	286000	294000	302000	310000	318000
2,3	326000	334000	342000	350000	358000	365000	373000	381000	389000	397000
2.4	405000	413000	421000	429000	437000	445000	—	—	—	—

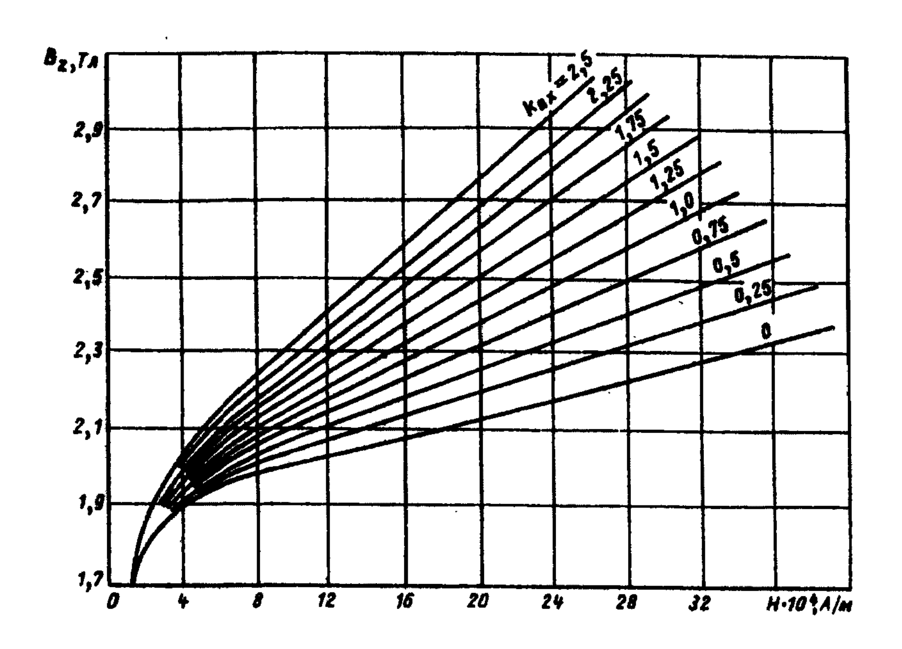


Рис. П4. Кривые намагничивания стали марки 1411
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока
и синхронных)

Таблица П9

Листовая электрическая сталь марок 1511, 1512, 1513 (высоколегированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	96	97	98	99	100	102	104	106	108	111
0,5	114	117	120	123	126	129	132	136	140	144
0,6	148	152	156	160	164	168	172	177	182	187
0,7	192	197	202	208	214	220	226	233	240	247
0,8	254	261	268	275	282	289	296	303	310	317
0,9	325	333	341	349	358	367	376	385	394	404
1	414	424	435	446	458	470	483	496	510	524
1,1	538	553	569	586	604	623	643	664	685	707
1,2	730	754	780	810	840	870	900	940	980	1030
1,3	1080	1140	1200	1270	1340	1410	1490	1590	1600	1720
1.4	1940	2060	2200	2340	2500	2700	2920	3140	3370	3600
1,5	3850	4060	4290	4520	4760	5000	5300	5650	6000	6350
1.6	6700	7100	7600	8100	8650	9300	10000	10700	11400	12200
1,7	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000
1,8	23000	24000	25000	26000	27000	28000	29000	30000	31200	32500
1,9	34000	35500	37000	38500	40500	42500	45000	51000	57000	63000
2	70000	77000	84500	92000	100000	108000	116000	124000	138000	140000
2,1	148000	156000	164000	172000	180000	188000	196000	204000	212000	220000
2,2	228000	236000	244000	252000	260000	268000	276000	284000	292000	300000

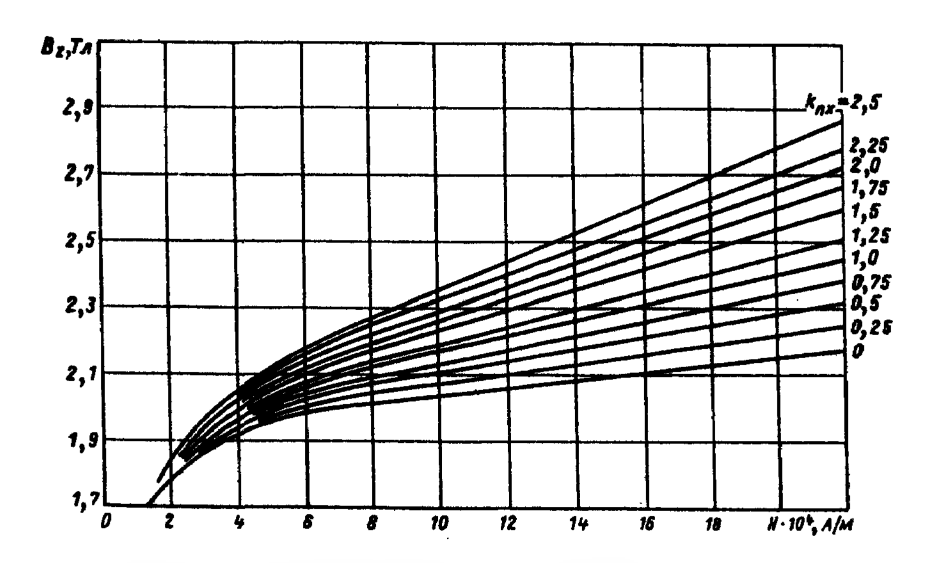


Рис. П5. Кривые намагничивания стали марок 1511, 1512, 1513
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока и синхронных)

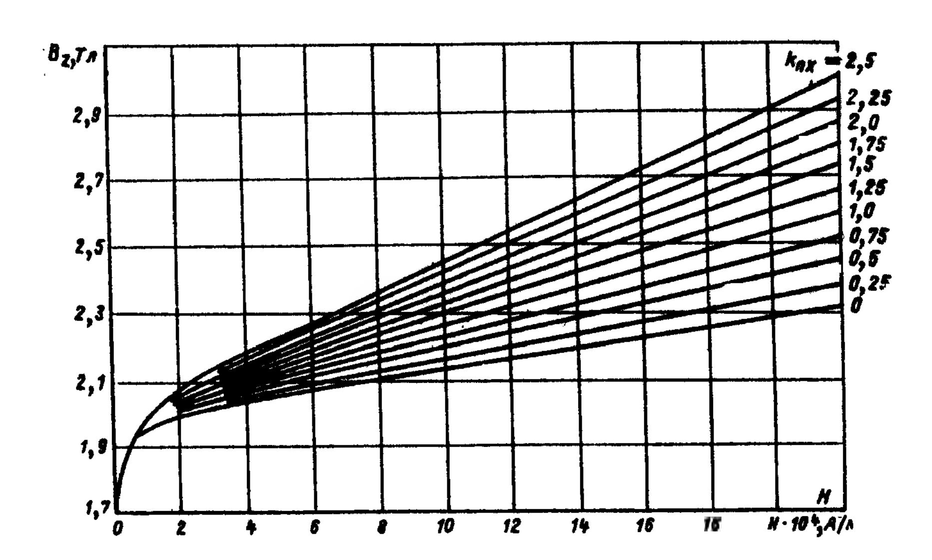


Рис. П6. Кривые намагничивания стали марки 3413
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока и синхронных)

Кривые намагничивания для зубцовых зон с учетом ответвления потока в пазы

B'_Z – расчетная индукция в зубцах, Тл;

$k_{nx} = \frac{S_{nx}}{S_{Zx}} = \frac{b_{nx} l_\delta}{b_{zx} l_{ct} k_c}$ – коэффициент, определяющий отношение площадей поперечных сечений паза и зубца на высоте h_{Zx}.

Таблица П10

Кривая намагничивания литой стали 08КП

B	H	B	H
Тл	А/м	Тл	А/м
0,00	0	1,40	1490
0,10	104	1,45	1750
0,20	140	1,50	2270
0,30	180	1,55	3050
0,40	210	1,60	4000
0,50	250	1,65	5250
0,60	295	1,70	7050
0,70	345	1,75	9320
0,80	405	1,80	11900
0,90	480	1,85	14800
1,00	570	1,90	18800
1,10	690	1,95	23500
1,20	845	2,00	29000
1,30	1080	2,05	34200
1,35	1260	2,09	39000

Таблица П11

Максимальная толщина изоляции обмоточных проводов

Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции при диаметрах голого провода d, мм							
	0,05–0,09	0,1–0,19	0,2–0,25	0,265–0,3	0,315–0,355	0,375–0,5	0,53–0,71	0,75–0,95
ПБД	–	–	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
АПБД	–	–	–	–	–	–	–	–
ПЭЛБО	–	–	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,07	0,075	0,09	0,1	0,105	0,11	0,115	0,125
ПСД, ПСДК	–	–	–	–	0,23	0,23	0,25	0,25
ПСДТ	–	–	–	–	0,18	0,18	0,19	0,2
ПСДКТ	–	–	–	–	0,14	0,14	0,16	0,16
ПДА	–	–	–	–	–	–	–	–
ПЭВП, ПЭМП, ПЭВППИ, ПЭТВП	–	–	–	–	–	–	–	–
ППТБО, ППЛБО	–	–	–	–	–	–	–	–

Окончание табл. П11

Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции							
	при диаметрах голого провода d, мм					прямоугольного провода при меньшей стороне сечения голого провода, мм		
	1–1,4	1,5–1,6	1,7–2,12	2,24–5	5–5,2	0,85–1,9	2,12–3,75	4–5,6
ПБД	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
АПБД	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
ПЭЛБО	0,21	0,21	0,21	–	–	–	–	–
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,135	0,155	0,155	–	–	–	–	–
ПСД, ПСДК	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,4
ПСДТ	0,21	0,21	0,23	–	–	–	–	–
ПСДКТ	0,18	0,18	–	–	–	0,22	–	–
ПДА	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,4	0,4	0,4
ПЭВП, ПЭМП, ПЭВППИ, ПЭТВП	–	–	–	–	–	0,1–0,12	0,15	–
ППТБО, ППЛБО	–	–	–	–	–	0,45	0,45	0,5

Таблица П12

Нагревостойкость, температурный индекс и конструктивные данные основных типов медных эмалированных проводов

Марка провода	Температурный индекс	Класс нагревостойкости	Тип эмалевой изоляции	Номинальные размеры токопроводящей жилы, мм	Двусторонняя толщина изоляции, мм
ПЭЛ	105	А	Эмаль на масляно-смоляной основе	0,02…2,50	0,010…0,02
ПЭВ-1	105	А	Высокопрочная эмаль на поливинилацетатной основе	0,02…2,50	0,01…0,02 0,02…0,085
ПЭВ-2	105	А	То же, с утолщенной изоляцией	0,02…2,50	0,025…0,090
ПЭМ-1	105	А	Высокопрочная эмаль на поливинилацетатной (поливинилформалевой) основе	0,02…2,50	0,02…0,08
ПЭМ-2	105	А	То же, с утолщенной изоляцией	0,06…2,50 0,06…0,45	0,025…0,085 0,033…0,085
ПЭВТЛ-1	120	Е	Высокопрочная эмаль на полиуретановой основе	0,05…1,60	0,015…0,007
ПЭВТЛ-2	120	Е	То же, с утолщенной изоляцией	0,05…1,60	0,02…0,08
ПЭВТЛК	120	Е	Двойная эмаль на основе полиуретановых и полиамидных смол	0,05…1,60	0,03…0,05
ПЭВТ-1	130	В	Высокопрочная эмаль на полиэфирной основе (лак ПЭ-943)	0,063…2,50	0,025…0,09
ПЭТВ-2	130	В	То же (лак ПЭ-939)	0,063…2,50	0,025…0,09
ПЭТ-155 и ПЭТВ	155	F	Высокопрочная эмаль на полиэфироимидной основе	0,06…2,44	0,025…0,09
ПЭТ-200	200	С	Полиамидные лаки, обеспечивающие высокие механическую прочность и нагревостойкость	0,05…2,50	0,025…0,06

Таблица П13

Шкала размеров электрощеток (в миллиметрах), $b_{щ} \times l_{щ} \times h_{щ}$

Тангенциальный размер $b_{щ}$	Осевой размер $l_{щ}$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
4	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	12,5	12,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	–	16	16	16	–	–	–	–	–	–	–
	–	–	20	20	20	20	–	–	–	–	–
5	–	12,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	–	16	16	16	–	–	–	–	–	–	–
	–	–	20	20	20	20	–	–	–	–	–
	–	–	25	25	25	25	25	–	–	–	–
	–	–	–	–	32	32	32	–	–	–	–
	–	–	–	–	–	–	40	–	–	–	–
6,3	–	–	20	20	20	–	–	–	–	–	–
	–	–	25	25	25	25	25	–	–	–	–
	–	–	–	32	32	32	32	32	32	–	–
	–	–	–	–	–	–	–	40	40	–	–
8	–	–	–	20	–	–	–	–	–	–	–
	–	–	–	25	25	25	25	25	–	–	–
	–	–	–	32	32	32	32	32	32	–	–
	–	–	–	–	–	–	–	40	40	–	–
	–	–	–	–	–	–	–	50	50	–	–
10	–	–	–	–	25	25	25	–	–	–	–
	–	–	–	–	32	32	32	32	32	–	–
	–	–	–	–	–	–	40	40	40	40	–
	–	–	–	–	–	–	–	50	50	50	–
12,5	–	–	–	–	–	25	–	–	–	–	–
	–	–	–	–	–	32	32	32	32	–	–
	–	–	–	–	–	–	40	40	40	40	–
	–	–	–	–	–	–	–	50	50	50	50
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	64	64
16	–	–	–	–	–	–	32	32	32	–	–
	–	–	–	–	–	–	40	40	40	40	–
	–	–	–	–	–	–	50	50	50	50	50
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	64	64
20	–	–	–	–	–	–	–	32	32	–	–
	–	–	–	–	–	–	–	40	40	40	–
	–	–	–	–	–	–	–	50	50	50	50
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	64	64
25	–	–	–	–	–	–	–	–	40	40	–
	–	–	–	–	–	–	–	–	50	50	50
	–	–	–	–	–	–	–	–	64	64	64
32	–	–	–	–	–	–	–	–	–	40	–
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	50	50
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	64	64
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	80
40	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	80
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	100

Примечание. Щетки шириной 25 мм и выше разделяются на две.

Таблица П14

Рекомендуемые расчетные параметры и условия работы щеток для электрических машин общего назначения

Обозначение марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность, А/см^2	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
Г-20	Угольно-графитные	2,9	15	40	50	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
Г-21		4,3	5	30	15–100	
Г-22		2,5	10	30	40	
Г3	Графитные	1,9	11	25	20–25	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактные кольца
611М		2	12	40	20–25	
6110М		2	15	90	12–22	
ЭГ2А	Электрографитированные	2,6	10	45	20–25	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ2АФ		2,2	15	90	15–21	
ЭГ4		2	12	40	15–20	
ЭГ8		2,4	10	40	20–40	
ЭГ14	То же	2,5	11	40	20–40	То же
ЭГ51		2,2	12	60	20–25	
ЭГ61		3	13	60	35–50	
ЭГ71		2,2	12	40	20–25	
ЭГ74		2,7	15	50	17,5–25	
ЭГ74А		2,3	15	60	15–21	
ЭГ85		2,3	15	50	17,5–35	

Окончание табл.П14

Обозначение марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность, А/см^2	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
М1	Металлографитные	1,5	15	25	15–20	Низковольтные генераторы и контактные кольца
М3		1,8	12	20	15–20	
М6		1,5	15	25	15–20	
М20		1,4	12	20	15–20	
МГ	То же	0,2	20	20	18–23	То же
МГ2		0,5	20	20	18–23	
МГ4		1,1	15	20	20–25	
МГ64		0,5	25	25	15–20	
МГС0		0,2	20	20	18–23	
МГС5		2	15	35	20–25	

Примечания:

1. При работе электрических машин в условиях повышенной вибрации и больших частот вращения коллектора (свыше 1500 об/мин) давление на щетку может быть повышено до 50 кПа.

2. Плотность тока щетки должна выбираться в зависимости от частоты вращения коллектора и условий коммутации каждого конкретного типа электрической машины.

3. Коэффициент трения щеток о коллектор принимается равным 0,25 для всех марок щеток.

Условное обозначение способов охлаждения электрических машин

Условное обозначение способов охлаждения электрических машин содержит две буквы латинского алфавита – IC (начальные буквы слов *International Cooling*) и следующие за ними характеристики целей охлаждения. Каждая характеристика в свою очередь состоит из букв латинского алфавита и двух цифр.

Буквы обозначают вид хладагента, используемого для данной цепи: воздух – A, водород – H, азот – N, фреон – F, вода – W, диоксид углерода – C, масло – V, керосин – K. Если в качестве хладагента используются другие, не переименованные газы или жидкости, то в обозначении приводят их полное наименование.

В цифровой части обозначения первая цифра условно обозначает устройство для циркуляции хладагента (табл. П8.1), вторая – способ перемещения хладагента (табл. П8.2).

Если машина имеет две или более цепи охлаждения, как, например, обдуваемые двигатели исполнения IP44 или машины с замкнутой системой охлаждения при наличии охладителей, то в обозначении указывают характеристики каждой из цепей, начиная с цепи со вторичным, т. е. имеющим более низкую температуру, хладагентом.

В целях упрощения обозначений допускается для наиболее распространенных систем воздушного охлаждения в условном обозначении опускать букву A; если способом перемещения хладагента является самовентиляция, то в обозначении допускается сохранять только первую цифру, характеризующую устройство цепи охлаждения, например, обозначать IC0 вместо IC01, как при полном обозначении.

Примеры условных обозначений систем охлаждения электрических машин приведены в табл. П15.– П16.

Таблица П15

Условное обозначение цепи циркуляции хладагента (первая цифра в условном обозначении системы охлаждения)

Цифра	Краткая характеристика цепи
0	Хладагент свободно подводится из окружающей среды к машине и свободно возвращается в эту среду – свободная циркуляция
3	Хладагент подводится к машине или к охладителю не из окружающей среды, а из другого источника через подводящую трубу или подводящий канал, а затем удаляется через отводящую трубу или отводящий канал на некоторое расстояние от машины – охлаждение при помощи подводящей и отводящей труб или каналов
4	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло через поверхность корпуса вторичному хладагенту, которым является среда, окружающая корпус машины. Поверхность корпуса машины может быть гладкой или ребристой для лучшей теплопередачи – охлаждение внешней поверхности машины
7	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло вторичному хладагенту в охладителе, встроенном в машину и являющемся ее неотъемлемой частью; вторичным хладагентом не является среда, окружающая машину – охлаждение при помощи встроенного охладителя, без использования окружающей среды
8	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло вторичному хладагенту в охладителе, являющемся независимым устройством, установленным непосредственно на машине; вторичным хладагентом не является среда, окружающая машину – охлаждение при помощи пристроенного охладителя без использования окружающей среды

Примечание. В таблице приведены обозначения не всех цепей циркуляции хладагента, используемых для охлаждения электрических машин.

Таблица П16

Условное обозначение способа перемещения хладагента (вторая цифра в условном обозначении системы охлаждения)

Цифра	Способ перемещения хладагента
0	За счет разницы температур – свободная конвекция; вентилирующее действие ротора машины незначительно
1	Вентилирующим действием ротора или при помощи специального устройства, расположенного на валу ротора машины, – самовентиляция
2	При помощи зависимого встроенного устройства, не смонтированного непосредственно на валу машины, например, встроенного вентилятора с зубчатой передачей или ременным приводом
3	При помощи зависимого пристроенного устройства, установленного непосредственно на машине, например, вентилятора, приводимого в действие электрическим двигателем, получающим питание от выводов охлаждаемой машины
7	При помощи отдельного устройства, не установленного на машине и не зависящего от нее, или под давлением в системе циркуляции хладагента, например, путем подачи воды из водопроводной сети или газа под давлением при помощи форсунки
8	Посредством относительного движения машины через хладагент, например тяговый двигатель, охлаждаемый воздухом, или двигатель, приводящий в движение вентилятор и охлаждаемый основным воздушным потоком

Таблица П17

Примеры условных обозначений систем охлаждения электрических машин

Система охлаждения	Обозначение*
Защищенная машина с самовентиляцией; вентилятор расположен на валу машины	IC01
Закрытая машина с естественным охлаждением без внешнего вентилятора	IC0040
Закрытая машина с ребристой или гладкой станиной, обдуваемая внешним вентилятором, расположенным на валу машины	IC0141
Закрытая машина с подводящей и отводящей трубами; машина охлаждается вентилятором с приводным электродвигателем, не установленным на машине	IC37
Закрытая машина с воздушным охлаждением и пристроенным водяным охладителем; циркуляция воды в охладителе осуществляется отдельным насосом или водопроводной сетью	ICW37A81

* См. табл. П15 и П16.

Таблица П18

Основные характеристики ИРН типа Я112, Я120

	9402.3702.01	Я112-АТ	Я112-В, Я112-ВТ	Я120-М	Я120-АТ	Я120-В, ВТ
Номинальное напряжение, В	14,1±0,1	13,5±0,2	13,6±0,2	28,0±0,3	27,5±0,3	27,5±0,3
Падение напряжения в выходной цепи регулятора, В	0,06	1,7	1,7	1,0	1,7	1,7
Максимальная сила тока обмотки возбуждения при окружающей температуре +25 °С, А	5,0	3,3	3,3	5,0	3,3	3,3
Кратковременное максимально допустимое напряжение, В	200,0	115	115	120	115	115
Максимальный перегрев основания ИРН, °С	-	25	25	-	25	25
Частота переключения, Гц	25…300	25…800	25…800	25…300	25…200	25…200
Рассеиваемая мощность, Вт	6	5,1	5,1	5,0	5,1	5,1
Габариты, м·10^{-3}	-	38x58x12	38x58x12	-	38x58x12	38x58x12
Масса, кг·10^{-3}	-	50	50	-	50	50

Таблица П19

Параметры диодов, применяемых в выпрямительных блоках генераторов

Параметры	ВК310	Д242	Д242А	Д242-Б	ВКД4-25	ВКД4-25-0	ВА-20	ВК-50	ВКД-50	КД202-В	КД208-А
Величина номинального прямого тока, А	10	10	10	5	25	25	20	50	50	5	1,5
Длительное значение прямого тока нагрузки, А	13	–	–	–	–	–	–	50	50	–	–
Номинальное обратное рабочее напряжение, В, не менее	100	100	100	100	150	150	150	150	150	70	100
Прямое падение напряжения при номинальном токе, В, не более	0,6	1,2	1,0	1,5	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,9	1,0
Величина обратного тока при максимальном обратном напряжении, мА, не более	3	3	3	3	5	5	3	1,0	1,0	0,8	0,05
Допустимая температура окружающей среды, °С	-50	-60	-60	-60	-50	-50	-50	-50	-50	-60	-40
Макс. доп. температура вентиля при длительном прямом токе, °С	+130	+125	+125	+125	+130	+130	+150	+140	+140	+130	+85

Окончание табл. П19

Параметры	ВК310	Д242	Д242А	Д242-Б	ВКД4-25	ВКД4-25-0	ВА-20	ВК-50	ВКД-50	КД202-В	КД208-А
Сроки службы, ч	10000	5000	5000	5000	10000	10000	8000	10000	10000	5000	5000
Диаметр корпуса вентиля под запрессовку, $м \cdot 10^{-3}$	12,77±0,04	–	–	–	$15^{+0,25}_{+0,15}$	$15^{+0,25}_{+0,15}$	12,77±0,04	–	–	–	–
Диаметр отверстия под запрессовку в теплоотводе, $м \cdot 10^{-3}$	$12{,}66^{+0{,}019}$	–	–	–	$15^{+0,035}$	$15^{+0,035}$	12,64±0,02	–	–	–	–
Максимальный диаметр буртика, $м \cdot 10^{-3}$	16	–	–	–	–	–	16	–	–	–	–
Максимальная высота вентиля с выводом, $м \cdot 10^{-3}$	21±0,5	–	–	–	35	35	18,8	–	–	37	37
Полярность на корпусе	плюс	плюс	плюс	минус	плюс	минус	–	плюс	плюс	–	–
Частота тока max, Гц	1200	1200	1200	1200	–	–	–	400	500	1200	1000
Усилие запрессовки вентиля в теплоотвод, Н	980…4900	–	–	–	≤ 9800	≤ 9800	980…4900	–	–	–	–

Таблица П20

Основные параметры выпрямительных блоков генератора

Тип блока	Тип генератора	Номинальное напряжение, В	Максимальная сила выпрямленного тока, А	Сила обратного тока при напряжении 150 В, мА	Число диодов
БПВ 6-50-02	Г221А, Г222	14	50	3	6
БПВ8- 100	Г286, Г289	14 и 28	100	10	12
БПВ 7-100-02	3812.3701, Г287	14 и 28	100	10	12
БПВ 11 -60	37.3701	14	60	5	9
БПВ 46-65-02	32.3701	14	65	5	6
БПВ 4-60-02	29.3701	14	60	5	6
БПВ 45-65-02	58.3701	14	65	5	6
БПВ 62-100-Т2	955.3701	14	65	5	15
БПВ 35-65-02	16.3701	14	65	5	6
БПВ 24-45	Г273	28	45	5	6
БПВ 56-65	Г221А, Г222	14	65	5	6
БПВ 76-80-02	94.3701	14	80	5	11

ОГЛАВЛЕНИЕ

Учебное издание

СЕРГЕЕВ Владимир Александрович
ТРОШИН Валентин Васильевич
МИФТАХОВ Миннихан Темиргалиевич

Теория, конструкция и расчет
вентильного автомобильного генератора
Часть 1

Редактор *В.В. Прокопова*
Компьютерная верстка *И.О. Миняева*
Выпускающий редактор *Ю.А. Петропольская*

Подп. в печать 22.05.13.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. п. л. 5,81. Уч.-изд. л. 5,78.
Тираж 50 экз. Рег. № 68/13

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
443100 г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100 г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8